



2008.
GODINA
LI



MATERIJALI 1 | KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES



MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

IZDAVAČ:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

REDAKCIONI ODBOR:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
glavni i odgovorni urednik
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Doc. dr Mirjana MALEŠEV, dipl.inž.,
zamenik odgovornog urednika,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Lazar JOVANOVIĆ, dipl.inž.,
Beograd, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIĆ, dipl.inž.,
Građevinski fakultet, Subotica

Prof. dr Žorž POPOVIĆ, dipl.inž.arh.,
Koče Kapetana 39, Beograd

Dr Ksenija JANKOVIĆ, dipl.inž.,
Institut IMS, Beograd

Dr Petar MITROVIĆ, dipl.inž.,
Institut za puteve, Beograd

Mr Radmila SINDJIĆ-GREBOVIĆ, dipl.inž.,
Građevinski fakultet, Podgorica

Mr Gordana Topličić-Čurčić, dipl.inž.,
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

ADRESA REDAKCIJE:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije
11000 Beograd, Kneza Miloša 9
Telefon: 011/3242-589

RECENZENTI:

Konačnu recenziju izvršio je Redakcioni odbor časopisa
na osnovu recenzentskih izveštaja

TEHNIČKI UREDNIK:

Stoja TODOROVIĆ

NASLOVNA STRANA: Administrativni objekat u ulici Kneza
Miloša u Beogradu. Projektant: Srbijaprojekt, izvođač:
Grading SS, Stručni nadzor: M.Bešević

TIRAŽ: 200 primeraka

Štampanje ovog broja pomogla je Inženjerska komora
Srbije.

Ovaj časopis primaju članovi Društva za ispitivanje i
istraživanje materijala i konstrukcija Srbije

PUBLISHER:

Society for Materials and Structures Testing
of Serbia

EDITOR AND CHIEF:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

EDITORIAL BOARD:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
editor and chief
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Dr Mirjana MALESEV, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, Civ.Eng.,
Belgrade, Vrnjaska 9

Prof. dr Aleksandar PROKIC Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering, Subotica

Prof. dr Zorz POPOVIC, Civ.Eng.,
Koče Kapetana 39, Belgrade

Dr Ksenija JANKOVIC, Civ.Eng.,
Institute IMS, Belgrade

Dr Petar MITROVIĆ, Civ.Eng.,
The Highway Institute, Belgrade

Mr Radmila SINDJIC-GREBOVIC, Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering, Podgorica

Mr Gordana Toplicic-Curcic, Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nis

THE ADDRESS OF THE EDITORIAL-STAFF:

Society for Materials and Structures Testing of Serbia
11000 Belgrade, Kneza Milosa 9
Telephone: 381 11/3242-589

REVIEWERS:

The review of papers done by the Editorial Board on the
reviewer's report

TECHNICAL EDITOR:

Stoja TODOROVIĆ

COVER: Administrative Building in K. Milosa street in
Belgrade (supervisor dr M.Besevic).

CIRCULATION: 200 examples

This number was published thanks to the financial
support of the Engineering Chamber of Serbia.

This Journal receive all the members of Society for
Materials and Structures Testing of Serbia

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
 SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
 JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

SADRŽAJ

Ivan IGNJATOVIĆ Snežana MARINKOVIĆ PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 2 – PRORAČUNSKI DOKAZI ZA RAZLIČITE DETERIORIZACIONE MEHANIZME Pregledni rad	3
Dragica JEVTIĆ MOGUĆNOST MODELIRANJA SVOJSTAVA BETONA U FUNKCIJI POVEĆANJA TRAJNOSTI Pregledni rad	18
Miodrag KIRIĆ O PRIMENI JEDNOG MODELA PODATAKA NA ISPITIVANJE MOSTOVA BEZ RAZARANJA Pregledni rad	32
Miloš KNEŽEVIĆ Radomir ZEJAK NEURONSKE MREŽE - PRIMJENA ZA IZRADU PROGNOZNOG MODELA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA ZA VITKE ARMIRANO- BETONSKE STUBOVE Originalni naučni rad	41
Uputstvo autorima	57

CONTENTS

Ivan IGNJATOVIC Snezana MARINKOVIC SERVICE LIFE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES: PART 2 – VERIFICATIONS FOR DIFFERENT DETERIORATION MECHANISMS ...	3
Dragica JEVTIC MODELING POSSIBILITY OF CONCRETE PROPERTIES IN ORDER TO INCREASE ITS DURABILITY.....	18
Miodrag KIRIC ON THE APPLICATION OF A DATA MODEL TO NONDESTRUCTIVE BRIDGES TESTING	32
Milos KNEZEVIC Radomir ZEJAK NEURAL NETWORKS-APPLICATION FOR USAGE OF PROGNOSTIC MODEL OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH FOR THIN REINFORCED-CONCRETE COLUMNS.....	41
Preview Report	57

PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 2 – PRORAČUNSKI DOKAZI ZA RAZLIČITE DETERIORIZACIONE MEHANIZME

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.012.3:620.179.7 = 861

1 UVOD

Predlog novog Modela propisa [7] koji se odnosi na obezbeđivanje trajnosti betonskih konstrukcija, donosi novi pristup projektovanju betonskih konstrukcija s obzirom na njihov upotrební vek. Osnovni koraci takvog koncepta su:

- definisanje modela deterioracionog mehanizma i kvantifikovanje parametara u modelu,
- definisanje graničnog stanja prema kome treba projektovati konstrukciju,
- definisanje tipa graničnog stanja (granično stanje nosivosti ili upotrebljivosti),
- izvođenje proračunskog dokaza odgovarajućeg graničnog stanja.

Osnovni pojmovi kao što su upotrební vek konstrukcije, deterioracioni procesi, moguća granična stanja, pouzdanost i različiti proračunski dokazi, objašnjeni su u prvom delu rada koji se odnosi na temu projektovanja prema upotrebnom veku konstrukcije [8]. U ovom delu rada biće objašnjena dva različita deterioraciona mehanizma: korozija armature usled karbonizacije betona i korozija armature usled dejstva hlorida, kvantifikacija parametara u modelima koji ih opisuju i proračunski dokazi odgovarajućih graničnih stanja.

2 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED KARBONIZACIJE, PRIMENOM PUNE PROBABILISTIČKE METODE

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

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{R - E < 0\} < p_0 \quad (1)$$

Ciljna vrednost verovatnoće pomenutog događaja p_0 , može biti izražena i preko indeksa pouzdanosti β [8]. Određivanje vrednosti uticaja od dejstava i/ili nosivosti primenom pune probablističke metode vrlo često predstavlja zametan posao, a proces se usložnjava sa povećanjem broja parametara (stohastičkih veličina) koji definišu razmatrani uticaj. To je osnovni razlog što se ova metoda koristi samo kod izuzetnih objekata, a probablistička priroda problema u većini slučajeva tretira kroz primenu parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Osnovna jednačina graničnog stanja depasivizacije armature usled karbonizacije koja mora biti ispunjena, glasi:

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (2)$$

gde je:

- $p\{ \}$ – verovatnoća da se desi depasivizacija armature
- a – debljina zaštitnog sloja [mm]
- $x_c(t_{SL})$ – dubina karbonizacije nakon vremena t_{SL} [mm]
- t_{SL} – proračunski upotrební vek [godine]

Adresa autora:

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

p_0 – zahtevana (ciljna) vrednost verovatnoće pojave loma.

Obe promenljive, a i $x_c(t_{SL})$ se određuju potpunim probabilističkim pristupom, uz kvantifikaciju svih parametara od kojih one zavise. Dubina karbonizacije u određenom trenutku vremena, t , definiše se na sledeći način [7]:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + e_t) \cdot C_S \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (3)$$

gde je:

$x_c(t)$ – dubina karbonizacije u određenom trenutku vremena t [mm]

t – vreme [godine]

k_e – funkcija okoline

k_c – parametar izvođenja

k_t – parametar povraćaja

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna vrednost otpornosti betona na karbonizaciju [(mm²/god)/(kg/m³)]

e_t – greška

C_S – koncentracija CO₂ u vazduhu [kg/m³]

$W(t)$ – funkcija vremenskih prilika.

Jednačina kojom se proračunava dubina karbonizacije betona (3), razvijena je u okviru dva velika evropska istraživačka projekta posvećena trajnosti betona: DuraCrete i Darts [2], [7]. Bazira se na difuziji kao dominantom načinu transportnog mehanizma CO₂ u betonu i važi za neisprskao beton. Za beton koji je isprskao od naprezanja koja potiču od opterećenja, treba obezbediti istu pouzdanost kao za neisprskao beton [7]. Može se reći da je postupak proračuna isti kao za neisprskao beton uz zadovoljenje uslova standarda koji se odnose na maksimalnu širinu prslina, [8].

2.1 Kvantifikacija parametara

2.1.1 Zaštitni sloj a

Kako je već rečeno, trajnost betona se ocenjuje stepenom oštećenja koje je beton pretrpeo usled hemijskih reakcija. Pri tome se u prvom redu misli na oštećenja zaštitnog sloja. Od kvaliteta zaštitnog sloja betona zavisi transport hemijski aktivnih supstanci, a time i stepen oštećenja. Penetracija ugljen-dioksida koji izaziva karbonizaciju ili prodor hlorida dešava se kroz zaštitni sloj koji obavlja armaturu i čini je pasivnom u odnosu na koroziju, pa je od izuzetne važnosti da zaštitni sloj bude zadovoljavajućeg kvaliteta, odnosno da ima ograničenu propustljivost. Ova karakteristika betona uslovljena je:

- vodo cementnim faktorom (niži vodo cementni faktor- niža propustljivost),

- tipom cementa i mineralnim dodacima (cementi sa dodacima mogu uticati na to da beton bude bolje propustljivosti od betona koji je samo na bazi Portland cementa),

- zbijanje (beton sa saćastom strukturom, tj. sa vidljivom segregacijom na površini ima veću propustljivost),

- kvalitet nege (nega određuje kvalitet očrščavanja površine betona i kontroliše pojavu termičkih prslina kao i prslina usled plastičnog skupljanja).

Izbor debljine zaštitnog sloja je jedna od faza u procesu projektovanja. Debljina zaštitnog sloja saglasno

izvođačkoj praksi varira, pa je zato treba posmatrati pre kao stohastičku nego kao konstantnu veličinu. Za statistički opis debljine zaštitnog sloja i njegovih varijacija koriste se beta, Weibull- ova, lognormalna ili Neville- ova raspodela, dok je primena normalne raspodele ograničena činjenicom da kod statističkih opisa tankih zaštitnih slojeva (nom $a \leq 20$ mm), omogućava pojavu negativnih vrednosti, što u slučaju razmatranog parametra nema smisla. Nominalna debljina zaštitnog sloja (nom a) praktično predstavlja i srednju vrednost debljine, s obzirom na činjenicu da je veličina nominalnog zaštitnog sloja obezbeđena postavljanjem distancera odgovarajućih dimenzija. Za funkciju raspodele debljih zaštitnih slojeva (nom $a \geq 25$ mm), može se primeniti i normalna raspodela sa srednjom vrednošću od $\mu = \text{nom } a$ [mm], dok je standardno odstupanje za zaštitni sloj a , prema funkciji normalne raspodele:

$$\sigma = 8 - 10 \text{ mm bez posebnih zahteva pri izvođenju}$$

$$\sigma = 6 \text{ mm sa posebnim zahtevima za izvođenje}$$

2.1.2 Proračunski upotrební vek t_{SL}

Dužina upotrebno g veka definisana je trajanjem procesa inicijalizacije, tj. traje do trenutka dostizanja graničnog stanja depasivizacije armature, mada je u određenim situacijama moguće da traje i duže [8]. Indikativne vrednosti proračunskog upotrebno g veka date su u tabeli 1. Prema EN 1990: 2002 [3], pomenute vrednosti u tabeli odnose se na proračunski eksploatacioni vek (engl. *design working life*).

2.1.3 Funkcija okoline k_e

Funkcija okoline uzima u obzir uticaj nivoa vlažnosti na difuzioni koeficijent, pa tako i na otpornost betona na karbonizaciju. Referentni klimatski podaci su temperatura vazduha $T = +20^\circ\text{C}$ i relativna vlažnost vazduha $RH = 65\%$.

Fukcija okoline k_e može se opisati pomoću jednačine:

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (4)$$

gde je:

RH_{real} – relativna vlažnost karbonizovanog sloja [%]

RH_{ref} – referentna relativna vlažnost [%]

f_e – eksponent

g_e – eksponent.

Strogo gledano, relativna vlažnost karbonizovanog sloja se mora uzeti u obzir. S obzirom da je veoma teško obezbediti takve podatke, i zahvaljujući činjenici da se proces karbonizacije dešava od spoljne površine betona ka unutra, kao dovoljno tačni smatraju se podaci o relativnoj vlažnosti vazduha u okolini konstrukcije. Kao ulazni podaci za relativnu vlažnost karbonizovanog sloja RH_{real} mogu se koristiti podaci iz najbliže meteorološke stanice. Kako relativna vlažnost varira u vrednostima od 0 do 100%, ograničena raspodela sa gornjom granicom treba da se koristi za opisivanje ova promenljive. U zavi-

Tabela 1. Proračunski upotrebnii vek u funkciji vrste objekta [3]

proračunski upotrebnii vek [god]	Primeri
10	Privremene konstrukcije (konstrukcije ili delovi konstrukcije koje se mogu raskopiti pa sa stanovišta ponovne upotrebe ne bi se trebalo smatrati privremenim)
10 - 25	Zamenjivi delovi konstrukcije (portalni nosači, ležišta)
15 - 30	Poljoprivredni i slični objekti
50	Zgrade i druge uobičajene konstrukcije
100	Monumentalne konstrukcije zgrada, mostovi i drugi građevinski objekti

snosti od geografske oblasti, donja granica relativne vlažnosti može biti značajno različita od nule. U takvom slučaju čini se razumnim da se grupe podataka opišu pomoću funkcije raspodele sa gornjom i donjom granicom, na primer beta ili Weibull- ovom raspodelom. Referentna relativna vlažnost mora da se uzme u saglasnosti sa uslovima testa za određivanje otpornosti betona na karbonizaciju. Za preporučeni ACC test (opisan u okviru poglavlja 2.1.5), referentne vrednosti su $T = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$. Dakle, RH_{ref} je konstantan parametar koji ima vrednost 65. Parametri g_e , f_e imaju konstantne vrednosti 2,5 i 5,0 respektivno.

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (5)$$

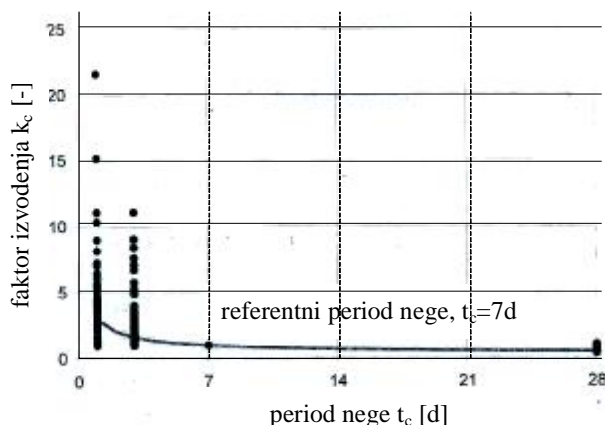
gde je:

- k_c - parametar izvođenja
- b_c - eksponent regresije
- t_c - period negovanja [dani].

Promenljiva b_c može se opisati pomoću normalne raspodele sa srednjom vrednošću od $\mu = -0,567$ i standardnom devijacijom $\sigma = 0,024$, dok je t_c konstantan parametar čija je vrednost jednaka periodu nege izraženim u danima.

2.1.4 Parametar izvođenja k_c

Parametar izvođenja k_c uzima u obzir uticaj nege na efektivnu otpornost betona na karbonizaciju. U ovom kontekstu, sve veličine koje se odnose na prevenciju prevremenog sušenja betona blizu površine, smatraju se parametrima nege. Dijagram na slici 1 ilustruje uticaj trajanja nege na efekte nege.



Slika 1. Faktor izvođenja u zavisnosti od trajanja nege betona [7]

Statistička kvantifikacija parametara k_c je izvedena prema Bayes-ovoj jednačini:

2.1.5 Inverzna karbonizaciona otpornost $R_{ACC,0}^{-1}$

U jednačini (3) za proračun dubine karbonizacije, kao jedan od faktora figuriše inverzna vrednost karbonizacione otpornosti betona. Usvojeno je da se karbonizaciona otpornost betona određuje ubrzanim karbonizacionim testovima (ACC test), prema kojima se laboratorijski čuvani uzorci testiraju pod definisanim uslovima u referentnom vremenu t_0 . Izvođenje ACC testa podrazumeva sledeće procedure:

- Proizvodnja betonskih uzoraka sa dimenzijama visina/širina/dužina = 100/100/150 [mm].
- Nakon uklanjanja oplata uzorci se potapaju u vodu sa temperaturom od $T_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$ tokom sedam dana (referentna nega).
- Nakon sedam dana, uzorci se vade iz vode i čuvaju narednih 21 dan u standardizovanim klimatskim uslovima ($T_{ref} = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$).
- Nakon 28 dana ($t_{ref} = 28$ d) uzorci se polažu u komoru za karbonizaciju sa standardizovanim klimatskim uslovima ($T_{ref} = +20^{\circ}\text{C}$ i $RH = 65\%$). U komori, uzorci su izloženi koncentraciji CO_2 od $C_S = 2,0$ vol.-% tokom 28 dana.
- Nakon vađenja iz komore uzorci se lome i meri se dubina karbonizacije u ravni loma sa indikatorom rastvora koji sadrži 1,0g fenolfaleina po litru.
- Na osnovu izmerene dubine karbonizacije može se odrediti srednja vrednost inverzne karbonizacione otpornosti, prema sledećoj jednačini:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{t} \right)^2 \quad (6)$$

gde je:

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost betona [(m²/s)/(kg/m³)]

t – vremenska konstanta [(s/(kg/m³)^{0,5}], za opisane uslove, $t = 420$

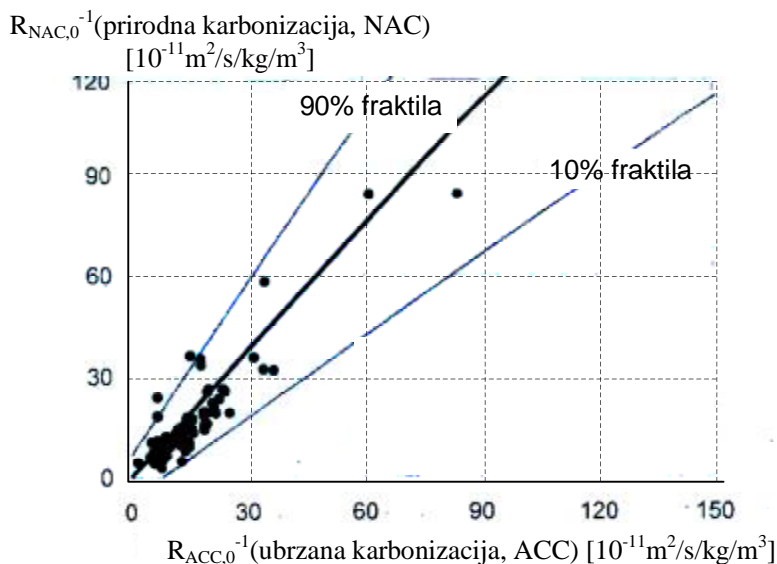
x_c – merena dubina karbonizacije [m].

Parametar $R_{ACC,0}^{-1}$ se može opisati funkcijom normalne raspodele čija je srednja vrednost data

jednačinom (6), a standardno odstupanje se računa pomoću izraza:

$$R_{ACC,0}^{-1} \text{ standardna devijacija} = 0,69 \times R_{ACC,0}^{-1} \text{ srednja vrednost}^{0,78} \quad (7)$$

Ukoliko ne postoje rezultati testa, kao približne vrednosti se mogu koristiti podaci iz literature [7]. Odnos između inverzne karbonizacione otpornosti određene pod prirodnim uslovima ($R_{NAC,0}^{-1}$) i ubrzanim testovima ($R_{ACC,0}^{-1}$) ilustrovan je na slici 2.



Slika 2. Odnos između inverzne karbonizacione otpornosti dobijene pod prirodnim uslovima i putem ubrzanog testa [7]

Inverzna karbonizaciona otpornost $R_{NAC,0}^{-1}$ određena pod prirodnim karbonizacionim uslovima biće veća od odgovarajuće otpornosti određene ACC testom za oko 25%. Ovo se može objasniti činjenicom da kod ubrzanog testa, sušenje ne prodire tako duboko u beton kao što je to slučaj kod betona u prirodnim uslovima ($T = +20^\circ\text{C}$ i $RH = 65\%$), što će malo usporiti proces karbonizacije pod ACC uslovima. Za veoma suve betone, ovo bi dalo teorijsku vrednost $R_{ACC,0}^{-1} = 0$. Kako beton nema beskonačnu otpornost, uveden je takozvani faktor greške $\varepsilon_t > 0$. Analitički izraz za vezu između inverznih karbonizacionih otpornosti betona pod laboratorijskim i prirodnim uslovima glasi:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \quad (8)$$

gde je:

$R_{ACC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost suvog betona određena u određenom trenutku vremena t_0 na uzorcima, pomoću ubrzanog karbonizacionog testa ACC [(mm²/god)/(kg/m³)]

$R_{NAC,0}^{-1}$ – inverzna karbonizaciona otpornost suvog betona ($RH = 65\%$), određena u određenom trenutku vremena t_0 na uzorcima, pomoću prirodnog karbonizacionog testa NAC [(mm²/god)/(kg/m³)]

k_t – parametar regresije koji uzima u obzir uticaj ubrzanog testa na rezultate dobijene pod prirodnim uslovima

ε_t – faktor greške koji uzima u obzir netačnosti koje se dešavaju povremeno kada se koristi ACC test [(mm²/god)/(kg/m³)].

Parametar regresije k_t opisuje se normalnom raspedelom sa srednjom vrednošću $\mu = 1,25$ i standardnom devijacijom $\sigma = 0,35$, dok faktor greške, ε_t , za istu statističku raspodelu ima srednju vrednost $\mu = 315,5$ i standardno odstupanje $\sigma = 48$.

2.1.6 Uticaj sredine C_S

Koncentracija CO₂ u vazduhu predstavlja direktan uticaj sredine na betonske konstrukcije. Ovaj uticaj se može opisati sledećom jednačinom:

$$C_S = C_{S,atm.} + C_{S,emi.} \quad (9)$$

gde je:

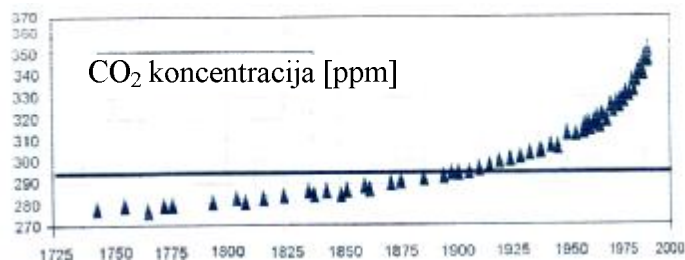
C_S – koncentracija CO₂ u vazduhu [kg/m³]

$C_{S,atm.}$ – koncentracija CO₂ u atmosferi [kg/m³]

$C_{S,emi.}$ – dodatna koncentracija CO₂ u vazduhu od emisionih izvora [kg/m³].

Povećanje CO₂ koncentracije se može primeniti kod, na primer, tunelskih konstrukcija ili kod konstrukcija koje su izložene radu motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Za uobičajene konstrukcije, prethodna jednačina se može redukovati na:

$$C_S = C_{S,atm.} \quad (10)$$



Slika 3. Porast srednje koncentracije CO₂ u atmosferi [7]

Trenutni sadržaj CO₂ u atmosferi nalazi se u granicama od 350 do 380 ppm (engl. *parts per million*). Ovo odgovara koncentraciji od 0,00057 do 0,00062 kg/m³. Standardno odstupanje sadržaja CO₂ je skoro konstanta sa maksimalnom vrednošću od 10 ppm. Ekstrapolacijom srednje koncentracije CO₂ u atmosferi (slika 3), dobija se očekivano povećanje koncentracije od 1,5 ppm po godini. Na osnovu predhodnih procena usvojeno je da se veličina C_{S,atm} [kg/m³] opiše funkcijom normalne raspodele sa srednjom vrednošću od μ=0,00082 i standardnim odstupanjem od σ = 0,0001.

2.1.7 Funkcija vremenskih prilika

Funkcija vremenskih prilika *W* uzima u obzir lokalne klimatske uslove na spoljašnjim površinama posmatranog elementa konstrukcije, usled vlaženja površine betona:

$$W = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t} \right)^w \quad (11)$$

gde je:

*t*₀ – referentno vreme [god], konstantan parametar čija je vrednost 0,0767

w – eksponent vremena

ToW – vreme vlaženja :

$$ToW = \frac{\text{broj_kišnih_dana_u_godini}}{365} \quad (12)$$

*p*_{SR} – verovatnoća jake kiše

*b*_w – eksponent regresije, sa srednjom vrednošću od μ=0,446 i standardnim odstupanjem od σ = 0,163, pri normalnoj raspodeli.

Efekat kiše na otpornost betona na karbonizaciju zavisi od orijentacije i geometrijskih karakteristika konstrukcije, i da bi se on odredio, potrebno je kvantifikovati vreme vlaženja *ToW* i verovatnoću jake kiše *p*_{SR}. Vreme vlaženja je prosečan broj kišnih dana u godini. Kišni dan se definiše kao dan sa minimalnom količinom padavina od 2,5 mm/m². Podaci za određivanje parametra *ToW* se mogu prikupiti obradom podataka iz najbliže meteorološke stanice. S druge strane, verovatnoća jake kiše definiše se kao "prosečna raspodela pravca duvanja vetra tokom padanja kiše" [7]. Ukoliko se razmatraju vertikalni elementi konstrukcije, parametar *p*_{SR} treba da se odredi na osnovu podataka iz najbliže meteorološke stanice, dok za horizontalne elemente ima vrednost 1,0. U slučaju unutrašnjih elemenata, tj. elemenata koji nisu izloženi dejstvu kiše, *p*_{SR}=0.

3 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED KARBONIZACIJE, PRIMENOM METODE PARCIJALNIH KOEFICIJENATA SIGURNOSTI

Proračunski dokaz primenom metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti za koroziju usled karbonizacije, granično stanje depasivizacije armature, prezentovan u ovom poglavlju, zasniva se na punom probablističkom pristupu koji je opisan u prethodnom poglavlju. Cilj primene metode parcijalnih koeficijenata je da se omogući, da se projektovanje prema zahtevima trajnosti (upotrebnom veku) sprovodi kao jednostavan dokaz, bez dodatnih razmatranja koja se odnose na probablističke raspodele ulaznih parametara. Razlika u pristupu dimenzionisanja zaštitnog sloja koji je ovde predstavljen i veličina koje se koriste u današnjoj praksi, uočljiva je na slici 4.

Na slici 4 korišćene su sledeće oznake:

min c – minimalni zaštitni sloj [mm],

nom c – nominalni zaštitni sloj [mm],

Δc – oblast između minimalnog i nominalnog zaštitnog sloja [mm],

*x*_{c,m}(*t*) – srednja vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t* [mm],

*x*_{c,d}(*t*) – proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t* [mm].

Element konstrukcije ispunjava zahteve trajnosti kada je u pitanju korozija usled karbonizacije, granično stanje depasivizacije, ukoliko je ispunjena jednačina graničnog stanja:

$$a_d - x_{c,d}(t_{SL}) \geq 0 \quad (13)$$

gde je:

*a*_d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja [mm]

*x*_{c,d}(*t*_{SL}) – proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu *t*_{SL} [mm].

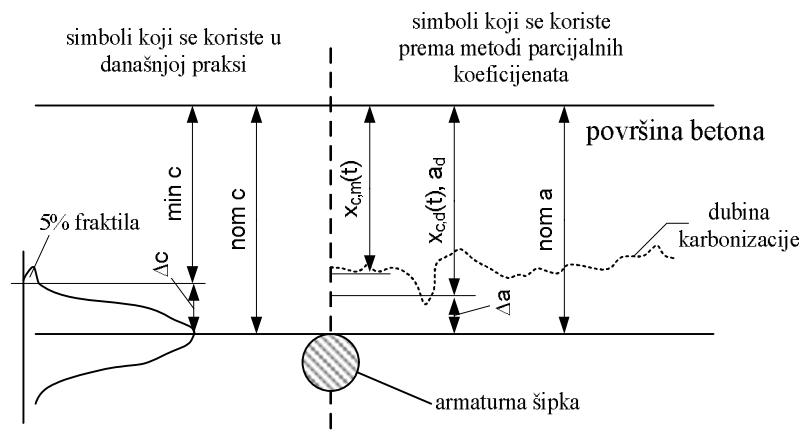
Proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja se računa kao:

$$a_d = a_k - \Delta a \quad (14)$$

gde je:

*a*_k – karakteristična vrednost debljine zaštitnog sloja [mm],

Δa – sigurnosna rezerva debljine zaštitnog sloja [mm].



Slika 4. Simboli koji se koriste u današnjoj praksi i prema metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti

Proračunska vrednost dubine karbonizacije u vremenu t_{SL} , $x_{c,d}(t_{SL})$ se računa kao:

$$x_{c,d}(t_{SL}) = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R^{-1}_{ACC,0,k} \cdot g_R + e_{t,d}) \cdot C_{S,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})} \quad (15)$$

gde je:

t_{SL} – proračunski upotrebnik vek [godine]
 $k_{e,d}$ – proračunska vrednost funkcije okoline

$$k_{e,d} = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real,k}}{g_{RH} \cdot 100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e} \quad (16)$$

$RH_{real,k}$ – karakteristična vrednost relativne vlažnosti karbonizovanog sloja [%]

RH_{ref} – referentna relativna vlažnost [%]

f_e , g_e – eksponenti sa vrednostima 5,0 i 2,5, respektivno

γ_{RH} – parcijalni koeficijent sigurnosti za relativnu vlažnost RH_{real}

$k_{c,d}$ – proračunska vrednost parametra izvođenja, koja se računa prema izrazu (12) za odgovarajući period nege

γ_R – parcijalni koeficijent sigurnosti za inverznu otpornost na karbonizaciju $R^{-1}_{ACC,0,k}$

Može se uočiti da je izraz za određivanje dubine karbonizacije prema metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti (15) gotovo identičan izrazu koji određuje istu veličinu putem pune probabilističke metode (3). Jedina razlika je što se u izrazu (15) koriste proračunske vrednosti parametara (engl. *design value*). Kao proračunske vrednosti uzimaju se ili srednje vrednosti veličina čija je kvantifikacija prikazana u poglavlju 2.1 ili, za ključne parametre, karakteristične vrednosti pomnožene odgovarajućim koeficijentima sigurnosti.

4 PRIMER PRORAČUNA POTREBNE DEBLJINE ZAŠITNOG SLOJA BETONA IZLOŽENOG KARBONIZACIJI

U brojnom primeru koji sledi, primenom metode parcijalnih koeficijenata sigurnosti, tj. korišćenjem jednačine (13), sračunata je potrebna debljina zašitnog sloja u funkciji željenog upotrebnog veka konstrukcije, tj. vremena izloženosti konstrukcije procesu karbonizacije. Konstrukcija u ovom primeru predstavlja vertikalni fasadni element napravljen od betona sa vodocementnim faktorom $w/c=0,6$, koji je izložen naizmeničnom vlaženju i sušenju u klimatskom području Srednje Evrope.

Parcijalni koeficijenti sigurnosti kojima se obuhvata probablistička priroda parametara treba da se odrede saglasno standardu ISO 2394: 1998 (Opšti principi pouzdanosti konstrukcija, engl. *General principles on reliability for structures*) [7]. Standard definiše proceduru parametarske studije kojom se određuju ključni parametri posmatranog mehanizma. Za proces karbonizacije koji je u ovom radu razmatran, utvrđeno je da su ključni parametri - funkcija okoline k_e , debljina zašitnog sloja a , kao i inverzna karbonizaciona otpornost betona određena ubrzanim testovima $R_{ACC,0}^{-1}$. Za te parametre uvedeni su koeficijenti sigurnosti γ_{RH} , γ_R , i sigurnosna rezerva Δa . Vrednosti koeficijenata sigurnosti koje su date u tabeli 2 su sračunate za upotrebnik vek od $t_{SL}=50$ godina i za indeks pouzdanosti $\beta=1,3$. Ovaj indeks pouzdanosti odgovara graničnom stanju "depasivizacija armature usled karbonizacije", koje je u ovom primeru definisano kao granično stanje upotrebljivosti, SLS, [8]. Dakle, ukoliko se želi veća pouzdanost, ili izabrano granično stanje može uticati na lom konstrukcije pa pripada graničnim stanjima nosivosti (ULS), moraju se modifikovati (povećati) parcijalni koeficijenti u skladu sa procedurama standarda ISO 2394.

Za sledeće parametre koji se ne smatraju ključnim, kao proračunske vrednosti se usvajaju srednje vrednosti odgovarajućih veličina:

$k_{t,d}$ – proračunska vrednost parametra regresije, $k_{t,d}=1,25$

$\varepsilon_{t,d}$ – proračunska vrednost faktora greške, $\varepsilon_{t,d}=315,5$

$C_{S,d}$ – proračunska vrednost koncentracije CO₂ [kg/m³], $C_{S,d} = 0,00082$

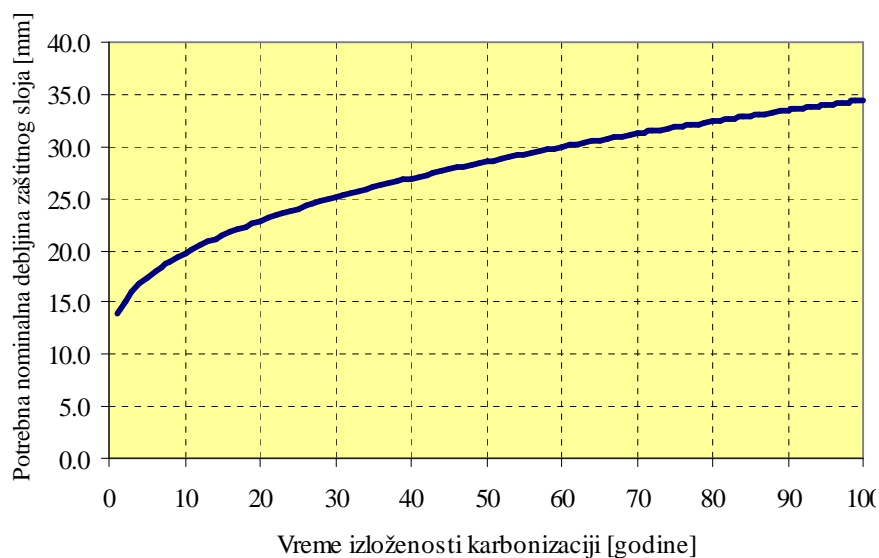
$b_{w,d}$ – proračunska vrednost eksponenta regresije, $b_{w,d} = 0,446$

Prikupljeni podaci koji se odnose na sredinu, difuzione karakteristike betona i nege betona, prikazani

su u tabeli 2, a dijagram zavisnosti nominalne debljine zaštitnog sloja od vremena izloženosti konstrukcije karbonizaciji prema jednačini (15), prikazan je na slici 5. Nominalna debljina zaštitnog sloja jednaka je zbiru proračunske vrednosti a_d i sigurnosne rezerve Δa .

Tabela 2. Ulazni podaci za sračunavanje dubine karbonizacije

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
$k_{e,d}$	RH _{real,k}	[% rel. vlažnosti]	80
	RH _{ref}	[% rel. vlažnosti]	65
	γ_{RH}	[-]	1.3
	g_e	[-]	2.5
	f_e	[-]	5.0
$k_{c,d}$	b_c	[-]	-0.567
	t_c	[dan]	3.0
$R_{NAC,0,d}^{-1}$	$k_{t,d}$	[-]	1.25
	$R_{ACC,0,k}^{-1}$	[(mm ² /god)/(kgCO ₂ /m ³)]	4500
	γ_R	[-]	1.5
	$\epsilon_{t,d}$	[(mm ² /god)/(kgCO ₂ /m ³)]	315.5
$C_{S,d}$		[kgCO ₂ /m ³]	0.00082
t_{SL}		[godine]	100
W	ToW	[-]	0.27
	$b_{w,d}$	[-]	0.446
	p _{SR}	[-]	0.1
	t_0	[god]	0.0767
a_d	a_{nom}	[mm]	?
	Δa	[mm]	10



Slika 5. Debljina zaštitnog sloja betona u funkciji vremena izloženosti procesu karbonizacije

5 PRORAČUNSKI DOKAZ GRANIČNOG STANJA DEPASIVIZACIJE ARMATURE USLED PENETRACIJE HLORIDA, PRIMENOM PUNE PROBABILISTIČKE METODE

U jednačini graničnog stanja za depasivizaciju armature usled penetracije hlorida, verovatnoća pojave koncentracije hlorida u betonu veće od kritične vrednosti koncentracije, treba da bude manja od neke ciljne vrednosti p_0 :

$$p\{ \} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C(a, t_{SL}) < 0\} < p_0 \quad (17)$$

odnosno, može se reći da depasivizacija armature počinje u trenutku kada koncentracija hlorida u betonu zaštitnog sloja dostigne kritičnu vrednost:

$$C_{crit} = C(x=a, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right] \quad (18)$$

gde je:

- C_{crit} – kritični sadržaj hlorida [tež.-%/beton],
- $C(x,t)$ – sadržaj hlorida u betonu na dubini x (površina betona: $x=0$) i u vremenu t [tež.-%/beton],
- C_0 – inicijalni sadržaj hlorida u betonu [tež.-%/c],
- $C_{S,\Delta x}$ – sadržaj hlorida u betonu na dubini Δx , u određenom trenutku vremena t [tež.-%/beton],
- x – dubina sa odgovarajućim sadržajem hlorida $C(x,t)$,
- a – debljina zaštitnog sloja [mm],
- Δx – dubina konvekcione zone [mm],
- $D_{app,C}$ – koeficijent difuzije hlorida kroz beton [mm^2/god],
- t – vreme [god],
- erf – funkcija greške (engl. *error function*).

Jednačina za proračun kritičnog sadržaja hlorida (18), kao i jednačina za proračun dubine karbonizacije (3), razvijena je u okviru pomenutih evropskih istraživačkih projekata posvećenih trajnosti betona: DuraCrete i Darts [2], [7].

Model kojim se opisuje mehanizam penetracije hlorida zasniva se na zakonima difuzije (2. Fikov zakon), uzimajući u obzir da većina istraživanja ukazuje na to da je prenos hlorida kroz beton difuziono kontrolisan. Površina betona je često izložena naizmjeničnim promenama vlažnosti i isparavanju pa se ova zona obično smatra za konvekcionsku zonu. S obzirom da u ovoj zoni prenosni mehanizam nije difuziono kontrolisan, primena zakona difuzije ne daje dobru aproksimaciju penetracije hlorida. Da bi se penetracija hlorida ipak opisala pomoću pomenutog zakona, podaci iz konvekcione zone se zanemaruju i 2. Fikov zakon se primenjuje počevši od rastojanja Δx od površine betona ($x \geq \Delta x$), sa zamenjujućom površinskom koncentracijom $C_{S,\Delta x}$.

Uobičajeno je da se koeficijent difuzije hlorida kroz beton ($D_{app,C}$) određuje primenom "Metode hloridnog profila" (engl. *Chloride profiling method*), [7]. Na ovaj način određen koeficijent ima konstantnu vrednost koja reprezentuje prosek za period vremena od početka izloženosti dejstvu hlorida do trenutka kada je uzet profil. Hloridni profil može biti uzet sa postojećih konstrukcija ili određen na uzorcima koji su čuvani u laboratoriji pod uslovima koji se očekuju u praksi. Kada se koeficijent $D_{app,C}$ određuje na postojećoj konstrukciji, minimalno vreme izloženosti hloridima je obično nekoliko meseci,

kako bi se dobili pouzdani podaci. S druge strane, određivanje koeficijenta $D_{app,C}$ na laboratorijskim uzorcima (pri projektovanju novih konstrukcija) je takođe vremenski zametan posao, pa se često pribegava empirijskim izrazima koji daju vezu između koeficijenta difuzije $D_{app,C}$ i koeficijenta migracije hlorida $D_{RCM,0}$:

$$D_{app,C} = k_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (19)$$

gde je:

- k_e – parametar prenosa uticaja sredine,
- $D_{RCM,0}$ – koeficijent migracije hlorida [mm^2/god],
- k_t – parametar prenosa,
- $A(t)$ – podfunkcija koje se odnosi na starenje.

$$A(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \quad (20)$$

a – eksponent starenja,

t_0 – referentni trenutak vremena [god].

Pri tome se koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$ određuje na uzorcima u laboratoriji primenom neke od ubrzanih metoda (engl. *rapid test methods*), a zatim koriguje parametrima kojima se uvodi u obzir uticaj stvarne temperature okoline (k_e) i uticaj starosti betona (k_t). Kako se ovi parametri određuju na osnovu poređenja rezultata ubrzanih testova i velikog broja hloridnih profila uzetih sa postojećih konstrukcija, na taj način se vrši kalibracija ubrzanih testova prema "Metodi hloridnog profila", koja se obavlja pod prirodnim uslovima.

5.1 Kvantifikacija parametara

5.1.1 Koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$

Koeficijent migracije hlorida $D_{RCM,0}$ je jedan od najznačajnijih parametara za opisivanje karakteristika materijala u modelu za koroziju armature usled penetracije hlorida. Odgovarajući podaci za koeficijent $D_{RCM,0}$ mogu se obezbediti iz literature i koristiti kao početne promenljive u proračunu s obzirom na upotrebnost konstrukcije. Međutim, ukoliko se radi sa specijalnim betonskim mešavinama, sa veoma niskim vodocementnim faktorima i visokim sadržajem plastifikatora, kvantitativni rezultati iz literature nisu dostupni. Zato je izuzetno važno da se kroz osnovne testove odredi kvalitet materijala koji će se koristiti, da bi se utvrdila podesnost projektovane betonske mešavine.

Među mnogim metodama za određivanje koeficijenta migracije hlorida, Rapid Chloride Migration method (RCM) pokazao se kao teorijski jasan, eksperimentalno jednostavan i što se tiče preciznosti i ponovljivosti, zadovoljavajućim oruđem. Suština metode ogleda se u nanošenju spoljašnjeg napona aksijalno kroz uzorak što izaziva migraciju hloridnih jona iz rastvora soli, NaCl u uzorak. Posle određenog vremena, uzorak se podužno deli na dva dela i na jednu od strana se nanosi srebrni rastvor nitrata. Usled reakcije koja se dešava, delovi betona koji su zasićeni hloridnim jonima postaju belo obojeni. Meranjem dubine penetracije hlorida može se sračunati traženi koeficijent [12].

Ukoliko se ne raspolaze sa rezultatima testa, u orijentacione svrhe za srednje vrednosti koeficijenta

$D_{RCM,0}$ mogu se koristiti podaci iz tabele 3, dok je standardno odstupanje definisano jednačinom:

$$\sigma = 0,2 \cdot \mu \quad (21)$$

gde je:

σ – standardno odstupanje za $D_{RCM,0}$,

μ – srednja vrednost za $D_{RCM,0}$.

5.1.2 Parametar prenosa i eksponent starenja

Koeficijent difuzije $D_{app,C}$ je podložan značajnom rasipanju vrednosti i ima tendenciju opadanja vrednosti sa povećanjem vremena izloženosti. Uzimajući ovo u obzir prilikom modeliranja inicijalnog procesa, uveden je parametar prenosa k_t u kombinaciji sa takozvanim eksponentom starenja α . Funkcionalna veza između perioda izloženosti t i koeficijenta difuzije $D_{app,C}$, za tri različita tipa cementa prikazana je u sledećoj tabeli. Statistička kvantifikacija eksponenta starenja urađena je na osnovu poređenja vrednosti za $D_{app,C}$ dobijenih iz hloridnog profila betona postojećih konstrukcija i rezultata RCM testa.

Podaci iz tabele se odnose na uslove izloženosti koji se označavaju kao “zona zapljuskivanja” (engl. *splash zone*), “plimska zona” (engl. *tidal zone*), i “potopljena zona” (engl. *submerged zone*), ali usvojeno na strani sigurnosti, takođe se može primeniti za “zonu prskanja”

(engl. *spray zone*), i “atmosfersku zonu” (engl. *atmospheric zone*), izloženosti.

Eksponent starenja koji odgovara jednačini (20) i tabeli 4, ne može se izmeriti RCM testom. RCM test daje eksponent starenja koji predstavlja samo određeni deo čitavog efekta, a koji se odnosi na povećanu otpornost penetraciji hlorida usled hidratacije betona koja se dešava istovremeno. Ukoliko postoji potreba da se preciznije odredi efekat starenja na otpornost betona, mogu se sprovesti dodatni testovi pri starosti uzorka od 56 ili 90 dana.

Da bi se izvršila kvantifikacija eksponenta starenja, vrednost parametra k_t je usvojena kao konstanta, $k_t=1,0$. Referentni period vremena je izabran da bude $t_0=0,0767$ god ($t_0=28$ d).

5.1.3 Parametar prenosa uticaja sredine k_e

Parametar prenosa uticaja sredine k_e je uveden da bi se uzeo u obzir uticaj stvarne temperature T_{real} na difuzioni koeficijent. Taj uticaj je opisan Arrhenius-ovom jednačinom:

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (22)$$

Tabela 3. Srednje vrednosti koeficijenta migracije hlorida za različite betonske mešavine [7]

$D_{RCM,0}$ [m^2/s]	$w/c_{eqv.}^{-1}$					
	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
tip cementa						
CEM I 42.5 R	n.d. ²	$8.9 \cdot 10^{-12}$	$10.0 \cdot 10^{-12}$	$15.8 \cdot 10^{-12}$	$19.7 \cdot 10^{-12}$	$25.0 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + FA (k=0.5)	n.d. ²	$5.6 \cdot 10^{-12}$	$6.9 \cdot 10^{-12}$	$9.0 \cdot 10^{-12}$	$10.9 \cdot 10^{-12}$	$14.9 \cdot 10^{-12}$
CEM I 42.5 R + SF (k=2.0)	$4.4 \cdot 10^{-12}$	$4.8 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²	n.d. ²	$5.3 \cdot 10^{-12}$	n.d. ²
CEM III/B 42.5	n.d. ²	$1.4 \cdot 10^{-12}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$	$2.8 \cdot 10^{-12}$	$3.0 \cdot 10^{-12}$	$3.4 \cdot 10^{-12}$

- ¹ ekvivalentni vodocementni faktor, uzimajući u obzir FA (leteći pepeo) ili SF (silikatna prašina) preko faktora uticaja k : u razmatranim mešavinama, sadržaj letećeg pepela je 22 % tež. u odnosu na cement, odnosno silikatne prašine 5 % tež. u odnosu na cement
- ² koeficijent migracije hlorida nije određen za ove betonske mešavine

Tabela 4. Statistička kvantifikacija eksponenta starenja [7]

beton	eksponent starenja α^5
Beton na bazi Portland cementa CEM I: $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.30$; $s^2=0.12$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Beton na bazi Portland cementa sa letecim pepelom $f \geq 0.20$; $k=0.50$; CEM I: $0.40 \leq w/c_{eqv} \leq 0.62$	Beta ($m^1=0.60$; $s^2=0.15$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Beton na bazi cementa sa zgurom CEM III/B: $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.45$; $s^2=0.20$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)

- ¹ m – srednja vrednost
² s – standardno odstupanje
³ a – donja granica
⁴ b – gornja granica

- ⁵ kvantifikacija se može primeniti za klase izloženosti: “zona zapljuskivanja”, “plimska zona” i “potopljena zona”

gde je:

k_e – parametar prenosa uticaja sredine,

b_e – regresiona promenljiva [K],

T_{ref} – standardna test temperatura [K],

T_{real} – temperatura elementa konstrukcije ili okolnog vazduha [K].

Da bi se rešila ova jednačina neophodno je da se odrede pomenuti parametri. Vrednost regresione promenljive varira između $b_e = 3500$ K i $b_e = 5500$ K i opisana je srednjom vrednošću od $\mu = 4800$ i standardnom devijacijom $\sigma = 700$.

Temperatura elementa konstrukcije ili ambijentalnog vazduha je opisana vrednostima promenljive T_{real} . T_{real} se može odrediti korišćenjem statističkih podataka (srednje vrednosti i standardnog odstupanja) iz najbliže meteorološke stanice. Standardna (referentna) test temperatura T_{ref} je određena kao 293 K ($=20^\circ\text{C}$) i može se smatrati konstantom.

5.1.4 Inicijalni sadržaj hlorida u betonu C_0

Sadržaj hlorida u betonu ne zavisi samo od propustljivosti hlorida sa površine, već i od hloridima zagađenog agregata, cementa ili vode koji se koriste za proizvodnju betona. Naročito ako se gradi u primorskim uslovima, sadržaj hlorida u sitnom i krupnom agregatu i vodi može biti značajan. Za razliku od raspodele sadržaja hlorida koji prodire sa površine betona, inicijalna količine hlorida po poprečnom preseku može se usvojiti kao ravnomerana.

5.1.5 Sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$

Sadržaj hlorida na površini betona C_S , kao i sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini na dubini Δx , $C_{S,\Delta x}$, su promenljive koje zavise od karakteristika materijala, geometrije konstrukcije kao i od uslova sredine. Karakteristike materijala koje treba uzeti u obzir su prvenstveno tip veziva i sastav betona. Najvažnija promenljiva koja opisuje uticaj sredine je ekvivalentna

koncentracija hlorida u vazduhu. Osim toga, od značaja mogu biti geometrija konstruktivnog elementa i rastojanje od izvora hlorida. Sve pomenute promenljive imaju direktan uticaj na sadržaj hlorida na površini betona i na sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$. Podaci potrebni da se odrede C_S i $C_{S,\Delta x}$ prikazani su na slici 6.

Parametar okoline zapravo kvantifikuje potencijalni uticaj okoline (koja sadrži hloride) na beton, imajući u vidu da dubina penetracije hlorida zavisi i od koncentracije hlorida na izvoru (morska voda, so za posipanje puteva.). Za konstrukcije u primorskom i priobalnom području, ovaj parametar koji se naziva potencijal hlorida, jednak je prirodnom sadržaju hlorida u morskoj vodi $C_{0,M}$.

$$C_{eqv} = C_{0,M} \quad (23)$$

gde je:

C_{eqv} – potencijal hlorida [g/l],

$C_{0,M}$ – prirodni sadržaj hlorida u morskoj vodi [g/l].

Za razliku od koncentracije hlorida u morskoj vodi $C_{0,M}$, varijacije koncentracije hlorida u vodi usled prisustva soli protiv smrzavanja $C_{0,R}$, su mnogo veće. Za konstrukcije koje u interakciju sa hloridnim jonima dolaze putem soli za posipanje puteva, odgovarajuća kvantifikacija C_{eqv} vrši se pomoću izraza:

$$C_{eqv} = C_{0,R} = \frac{n \cdot C_{R,i}}{h_{S,i}} \quad (24)$$

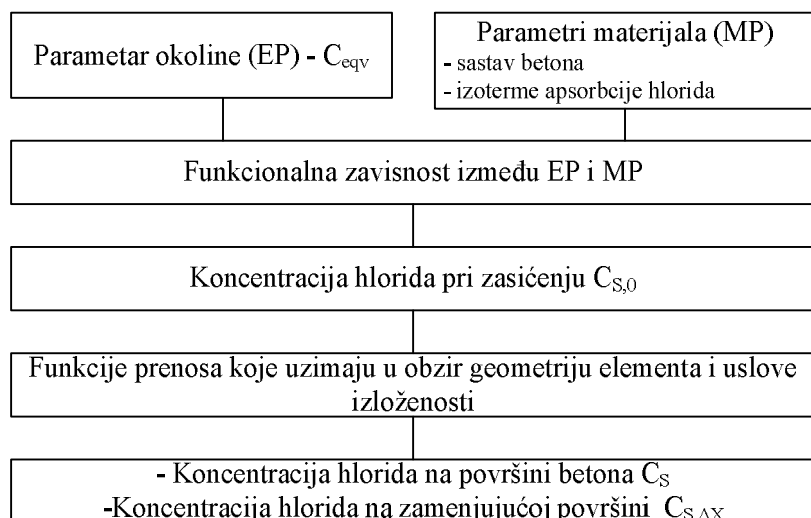
gde je:

$C_{0,R}$ – prosečan sadržaj hlorida u hloridno kontaminiranoj vodi [g/l],

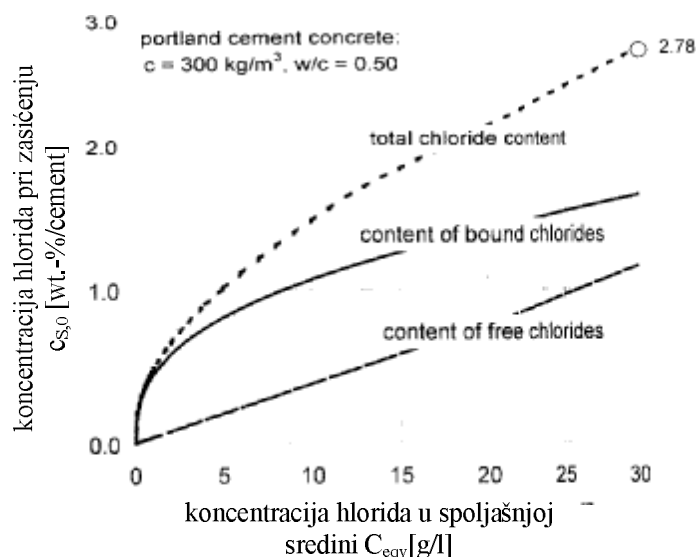
n – prosečan broj posipanja soli tokom godine,

$C_{R,i}$ – prosečna količina rasutih hlorida tokom jednog posipanja soli [g/m²],

$h_{S,i}$ – količina vode od kiše i otopljenog snega tokom jedne zimske sezone (dok traje posipanje soli) [l/m²].



Slika 6. Podaci potrebni za određivanje promenljivih C_S i $C_{S,\Delta x}$ [7]



Slika 7. Sadržaj hlorida na površini betona u zavisnosti od potencijala hlorida za beton od Portland cementa [7]

Da bi se sračunala vrednost koncentracije hlorida pri zasićenju, $C_{S,0}$, moraju biti određene karakteristike materijala kao što su izoterme apsorpcije hlorida, za cement koji se koristi i sastav betonske mešavine (slika 7). Ove karakteristike imaju izražen uticaj kako na fizički tako i na hemijski vezivni kapacitet materijala i zapreminu pora koje treba da se zasite do mere da je koncentracija hlorida u porama balansirana sa koncentracijom u sredini u kojoj se nalazi element konstrukcije.

Kada se odrede izoterme apsorpcije hlorida, sastav betona i potencijal hlorida (C_{eqv}), može se odrediti i koncentracija hlorida pri zasićenju, $C_{S,0}$. Slika 7 pokazuje korelaciju između $C_{S,0}$ i C_{eqv} za beton spravljen sa Portland cementom ($c = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0,5$).

Pod stalnim uticajem hlorida konstantne koncentracije, koncentracija zasićenosti hloridima $C_{S,0}$ na površini betona se često dostiže u relativno kratkom vremenskom periodu u poređenju sa projektovanim upotrebnim vekom ($C_{S,0} = C_S$). Uzimajući u obzir ovo, kao i rezultate istraživanja, može se izvršiti pojednostavljenje i smatrati da je sadržaj hlorida na površini betona C_S konstantan od početka, npr. za beton koji je stalno izložen uticajima morske vode. Ovo uprošćenje je na strani sigurnosti.

5.1.6 Funkcija prenosa Δx

Ako je element konstrukcije povremeno izložen dejstvu rastvora konstantne ili promenljive koncentracije hlorida, mora da se formuliše funkcija prenosa. Kod elemenata konstrukcije koji su povremeno izloženi dejstvu hloridom kontaminiranog rastvora, a u međuvremenu je omogućeno isparavanje vode iz betona blizu površine, svako naredno vlaženje uzrokuje proces kapilarnog upijanja. U poređenju sa difuzionim procesom, kapilarno upijanje dovodi do brzog prenosa hlorida kroz beton do dubine Δx , gde se hloridi mogu akumulirati tokom vremena dok se ne dostigne koncentracija zasićenja $C_{S,\Delta x} = C_{S,0}$.

Za betonske elemente koji se nalaze u "zoni zapljuskivanja", prosečna dubina do koje hloridi mogu brzo prodrati može biti ograničena sa: $6,0 \text{ mm} \leq \Delta x \leq 11,0 \text{ mm}$. Parametar Δx određuje se pomoću Beta raspodele (sa srednjom vrednošću od $\sigma = 5,6$, standardnim odstupanjem od $\mu = 8,9$, donjom granicom $a = 0,0$ i gornjom granicom od $b = 50,0$) za betonske elemente koji se nalaze u "zoni zapljuskivanja" bilo da se radi o priobalnim konstrukcijama, bilo da se radi o konstrukciji u blizini puta koji se posipa solju.

Ukoliko je rastojanje od površine puta koji se posipa solju do elementa čija se trajnost razmatra veća od 1,5m ("zona prskanja"), ne može se uočiti formiranje konvekcione zone, tj. $\Delta x = 0$.

Za delove konstrukcije koji su konstantno potopljeni ("potopljena zona"), površinska koncentracija C_S je jednaka koncentraciji zasićenja hloridima, koja se spontano razvija. Zbog toga, za ovaj specijalni slučaj, nikakva funkcija prenosa ili parametar prenosa nije potreban, odnosno $\Delta x = 0$.

Ako je konstrukcija izložena u "plimskoj zoni", treba da bude određena dubina do koje postoji odstupanje od difuzionog procesa saglasnog sa Fick-ovim rešenjem. Parametar Δx određuje se pomoću Beta raspodele, pri čemu treba odrediti parametre μ, σ i a i b .

5.1.7 Površinski sadržaj hlorida C_S i sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}$

Kontaminacija hloridima elementa konstrukcije u "zoni zapljuskivanja" ili "zoni prskanja" raste sa smanjenjem rastojanja od izvora hlorida. Ovo je potvrđeno i za horizontalna i za vertikalna rastojanja [7]. Iako je sadržaj hlorida na zamenjujućoj površini $C_{S,\Delta x}(t)$ teorijski promenljiva veličina koja zavisi od vremena, u cilju pojednostavljenja, smatra se vremenski nezavisnom veličinom.

Za konstrukcije u "zoni zapljuskivanja", parametar $C_{S,\Delta x}$ se definiše kao maksimalni sadržaj hlorida C_{max} u okviru hloridnog profila.

Kako je iz testova proizašlo da za beton na rastojanju većem od 1,5 m od puta koji se posipa solju ("zona prskanja") nema razvoja konvekcione zone, to je sadržaj hlorida na površini betona C_s jednak maksimalnom sadržaju hlorida C_{max} .

Za potopljene konstrukcije sadržaj hlorida na površini betona C_s jednak je koncentraciji hlorida pri zasićenju $C_{s,0}$.

5.1.8 Kritični sadržaj hlorida C_{crit}

Kritični sadržaj hlorida, C_{crit} se definiše kao ukupni sadržaj hlorida koji vodi do depasivizacije površine armature i početnog rastvaranja gvozdene obloge armature (feroksida), [7]. Kako je donja granica promenljive C_{crit} definisana kao $C_{crit,min} = 0,20$ tež.-%/cement, čini se pogodnim koristiti Beta raspodelu sa donjom granicom za opis rezultata testa kojim se utvrđuje kritični sadržaj hlorida koji uzrokuje koroziju.. Parametri Beta raspodele su:

- srednja vrednost - $\mu = 0,60$ tež.-%/cement,
- standardno odstupanje - $\sigma = 0,15$,
- donja granica - $a = 0,2$ tež.-%/cement,
- gornja granica - $b = 2$ tež.-%/cement.

6 PRIMER PRORAČUNA POTREBNE DEBLJINE ZAŠTITNOG SLOJA BETONA IZLOŽENOG DEJSTVU HLORIDA

U primeru se razmatra pitanje trajnosti armiranobetonskih stubova mosta preko vodene prepreke (mora). Potrebno je odrediti neophodnu debljinu zaštitnog sloja, kao i vrednost debljine zaštitnog sloja u funkciji vremena izloženosti dejstvu hlorida, za zahtevani upotrebni vek od 100 godina i zahtevanu pouzdanost $\beta = 2,3$. Proračun se sprovodi poluprobabilističkom metodom, tj. metodom parcijalnih koeficijenata sigurnosti.

Dakle, zahtevana vrednost indeksa pouzdanosti u ovom primeru je $\beta = 2,3$. Parametri koji su od najvećeg uticaja na koncentraciju hlorida u betonu su površinska koncentracija hlorida i koeficijent difuzije hlorida. Za te dve promenljive su prema zahtevanom indeksu pouzdanosti kalibrisani koeficijenti sigurnosti i prikazani u tabeli 5 ($\gamma_{Cs} = 1,35$ i $\gamma_D = 2,2$), [2]. Površinska koncentracija hlorida i koeficijent difuzije su veličine koje definišu dejstvo hlorida na presek i po analogiji sa uticajem opterećenja kod proračuna nosivosti, množe se odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. S druge strane, kritični sadržaj hlorida je pojam koji se može uporediti sa otpornošću preseka na dejstvo sila pri proračunu nosivosti, pa se ta veličina deli odgovarajućim koeficijentom sigurnosti. U ovom primeru, za zadati indeks pouzdanosti, koeficijent sigurnosti iznosi $\gamma_{Ccrit} = 1,05$ [2].

Polazi se od jednačine graničnog stanja (18). Potrebno je uporediti proračunsku vrednost kritične koncentracije hlorida u betonu sa sadržajem hlorida u zaštitnom sloju betona nakon difuzije sa spoljašnje površine betona. Radi pojednostavljenja proračuna usvojeno je da je vrednost inicijalne količine hlorida u betonu $C_0 = 0$, tj. sastav betonske mešavine je takav da u njemu ne postoje hloridi. S obzirom da su cilj ispitivanja

stubovi koji se tokom čitavog upotrebno veka nalaze u vodi (jednim delom u vodi, a jednim u neposrednoj blizini), kao zona uticaja hlorida za čitav stub može se usvojiti ili "potopljena zona" ili "zona prskanja". U tako definisanim zonama ne postoji konvekciona zona u kojoj ne važe zakoni difuzije, tj. $\Delta x = 0$, (poglavlje 5.1.6).

Uzimajući prethodno u obzir i primenjujući metodologiju proračuna sa parcijalnim koeficijentima sigurnosti, jednačina graničnog stanja se može napisati kao:

$$g = C_{crit}^d - C^d(x, t) \quad (25)$$

odnosno, trenutak depasivizacije armature i stvaranja uslova za koroziju je:

$$g = 0 \rightarrow C_{crit}^d = C^d(x, t) \quad (26)$$

gde je:

C_{crit}^d – proračunska kritična vrednost koncentracije hlorida

$C^d(x, t)$ – proračunska vrednost koncentracije hlorida na rastojanju x od spoljašnje površine betona nakon vremena t izloženosti dejstvu hlorida

Prethodna jednačina, uz $x=a$, se može napisati kao:

$$C_{crit}^d = C_s^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a^d}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C}^d(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (27)$$

gde je:

C_s^d – proračunska vrednost koncentracije hlorida na površini betona

erf – funkcija greške - $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} dt$

a^d – proračunska vrednost debljine zaštitnog sloja

$D_{app,C}^d$ – proračunska vrednost koeficijenta difuzije hlorida

t – vreme izloženosti betona dejstvu hlorida

Zamenjujući vrednost za $D_{app,C}$ prema izrazu (19), dobija se:

$$C_{crit}^d = C_s^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e \cdot D_{RCM,0}^d \cdot k_t \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \cdot t}} \right) \right] \quad (28)$$

odnosno, uvodeći parcijalne koeficijente sigurnosti za ključne parametre:

$$\frac{C_{crit}^c}{g_{Ccrit}} = (C_s^c \cdot g_{Cs}) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{a_{nom} - \Delta a}{2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^a \cdot g_D \cdot t}} \right) \right] \quad (29)$$

gde gornji indeks c označava karakterističnu vrednost pojedinih parametara.

Traženu veličinu, tj. nominalnu debljinu zaštitnog sloja, na kraju dobijamo kao:

$$a_{nom} = \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{crit}^c}{g_{C_{crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot g_{C_S}} \right) \cdot 2 \cdot \sqrt{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot g_D \cdot t + Da} \quad (30)$$

gde je erf^{-1} inverzna funkcija funkcije greške.

$$t = \left[\frac{2}{a_{nom} - \Delta a} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{crit}^c}{g_{C_{crit}}} \cdot \frac{1}{C_S^c \cdot g_{C_S}} \right) \right]^2 \cdot \frac{1}{k_e^c \cdot D_{RCM,0}^c \cdot k_t^c \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^a \cdot g_D} \quad (31)$$

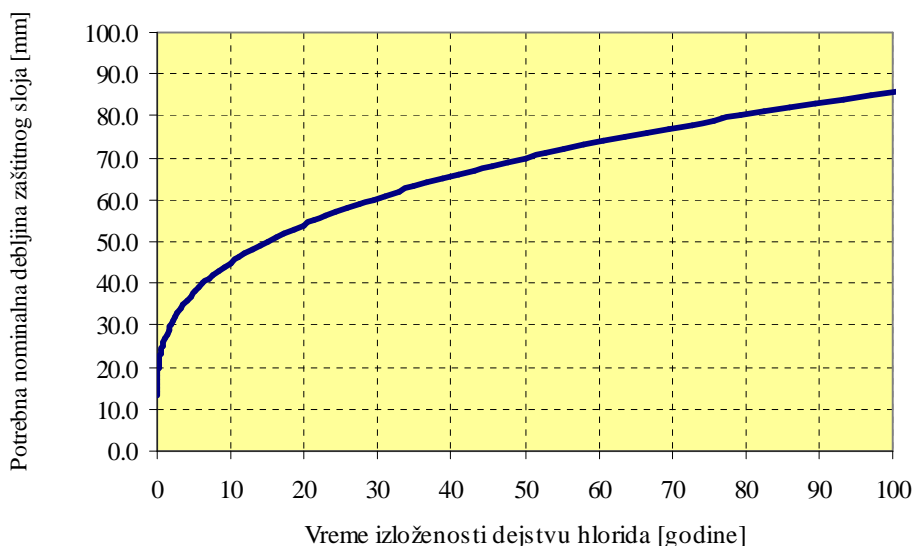
U tabeli 5 prikazane su vrednosti parametara i koeficijena sigurnosti koji su korišćeni u brojnom primeru. Zamenjujući vrednosti iz tabele 5 u prethodni izraz, dobija se potrebna nominalna debljina zaštitnog sloja betona od 86 mm, za stub izložen dejstvu hlorida, čiji je zahtevani upotrebnii vek 100 god.

Ukoliko je poznata nominalna debljina zaštitnog sloja i ostali podaci iz tabele, iz izraza se može sračunati dužina trajanja upotrebnog veka konstrukcije i uporediti sa postavljenim zahtevom:

Tabela 5. Ulazni podaci za sračunavanje potrebne debljine zaštitnog sloja betona u uslovima hloridno agresivne sredine

Parametar		Jedinica	Ulazni podatak
C_{crit}^d	C_{cr}	[tež.%/beton]	0.9
	$\gamma_{C_{crit}}$	[-]	1.05
C_S^d	C_S	[tež.%/beton]	2.33
	γ_{C_S}	[-]	1.35
$k_{e,d}$	T_{ref}	[K]	293
	T_{real}	[K]	298
	b_e	[-]	4800
$k_{t,d}$		[-]	0.85
A(t)	t_0	[god]	0.0767
	a	[-]	0.3
γ_D		[-]	2.2
$D_{RCM,0}$		[m ² /s]	79
a_d	a_{nom}	[mm]	?
	Δa	[mm]	12

Funkcionalna zavisnost između dužine izloženosti dejstvu hlorida i potrebne nominalne debljine zaštitnog sloja betona, može se prikazati dijagramom na slici 8.



Slika 8. Debljina zaštitnog sloja betona u funkciji vremena izloženosti uticajima hloridno agresivne sredine

7 ZAKLJUČAK

U ovom delu rada posvećenom projektovanju betonskih konstrukcija s obzirom na upotrebnost, glavni akcent je stavljen na kvantifikovanje parametara koji opisuju dva najznačajnija deterioraciona mehanizma. – korozija armature usled karbonizacije betona i korozija armature usled penetracije hlorida. Za ove procese napravljeni su i numerički primeri čiji rezultati mogu poslužiti za komparativnu analizu uticaja svakog od deterioracionih procesa i za sagledavanje vremenske komponente svakog od njih. Pri poređenju dobijenih rezultata treba imati na umu da je u slučaju korozije armature usled karbonizacije usvojen niži indeks pouzdanosti ($\beta = 1,3$) nego u slučaju korozije armature usled prodora hlorida ($\beta = 2,3$). Takođe, potrebne debljine zaštitnih slojeva prikazane na dijagramima, ne mogu se usvojiti kao “preporučene” za sve betonske konstrukcije, već važe samo za konstrukcije u okruženjima definisanim na početku oba primera i za usvojeni nivo pouzdanosti.

U svakom slučaju, rezultati ukazuju na izuzetno veliku opasnost koja pretili konstrukcijama koje su izložene dejstvu hlorida, bilo da su u blizini mora, bilo da hloridi potiču iz soli koja se u zimskim uslovima koristi za odmrzavanje leda na kolovozima. Potencijalno, najviše su ugrožene javne otvorene garaže čiji se broj, u našim uslovima, neprestano povećava, kao i kolovozne ploče mostovskih konstrukcija. Aktuelno stanje beogradskih mostova govori u prilog tezi da su preporučene debljine zaštitnih slojeva iz aktuelnih propisa neadekvatne za obezbeđivanje zahtevanog upotrebnog veka od 100 godina uz odgovarajući stepen pouzdanosti. Naravno, treba imati na umu da su velike potrebne debljine zaštitnih slojeva prikazane na slici 8 dobijene primenjujući relativno visoke koeficijente sigurnosti, kako bi bio zadovoljen proračunski uslov koji se tiče indeksa pouzdanosti. Ukoliko bi se depasivizacija armature posmatrala kao granično stanje upotrebljivosti, indeks pouzdanosti bi se mogao usvojiti kao $\beta = 1,3$ [8], pa bi odgovarajući parcijalni koeficijenti sigurnosti bili niži, što bi rezultovalo manjim potrebnim debljinama zaštitnih slojeva, ali još uvek većim od onih koje preporučuju naši propisi [1].

8 LITERATURA

- [1] BAB 87, Knjiga 2 Prilozi, Građevinska Knjiga, 1991, str.3-111.
- [2] [Edwardsen C., Mohr L.: DuraCrete – A guideline for durability-based design of concrete structures, Brite-EuRam Programme (Report No. BE95-1347, 2000), str. 10
- [3] EN 1990: 2002, Evrokod 0: Osnove proračuna konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2002, str. 87
- [4] EN 1992: 2004, Evrokod 2: Proračun betonskih konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006, str. 237
- [5] *fib* bulletin 3: Structural Concrete, Volume 3, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 1999, str.269.
- [6] *fib* bulletin 17: Management, maintenance and strenghtening of concrete structures, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 2002, str.174.
- [7] *fib* Task Group 5.6: Model Code for Service Life Design, International Federation for Structural Concrete *fib*, Lausanne, Switzerland, 2006, str. 116
- [8] [Ignjatović I., Marinković S.: Projektovanje betonskih konstrukcija prema upotrebnom veku: deo 1 – Osnovni pojmovi trajnosti i pouzdanosti, Materijali i konstrukcije 4, 2007, str. 3-15
- [9] [Implementation of Eurocodes- Handbook 2: Reliability backgrounds, Leonardo da Vinci Pilot Project , 2005, str. 254
- [10] Koji T., Yamaguchi T., Maeda S.: Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to chloride Attack, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, No. 2, July 2003, str. 139-146
- [11] Marinković S., Ignjatović I.: Savremeni koncept projektovanja i građenja betonskih konstrukcija, Građevinski kalendar 2008, str. 181-233
- [12] NordTest Build 492: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordisk Innovations Center, 1999, str. 8
- [13] [Schiessl P., Gehlen C., Kapteina G.: Assessment and service life updating of existing tunnels, First International Symposium: "Safe & Reliable Tunnels? Innovative European Achievements", Prague 2004, str.189-198.

REZIME

PROJEKTOVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA PREMA UPOTREBNOM VEKU: DEO 2 – PRORAČUNSKI DOKAZI ZA RAZLIČITE DETERIORACIONE MEHANIZME

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

Primena koncepta projektovanja betonskih konstrukcija s obzirom na njihov upotrební vek, kao preduslov ima dobro poznavanje deterioracionih procesa. Na osnovu toga, uspostavljeni su fizički ili hemijski modeli za simulaciju tih procesa i izvršena je kvantifikacija parametara koji u tim modelima učestvuju, za dva najznačajnija deterioraciona mehanizma: koroziju armature usled karbonizacije i koroziju armature usled prodora hlorida. Kvantifikacija podrazumeva statističku obradu podataka dobijenih laboratorijskim ispitivanjima i posmatranjima in situ i njihovo prikazivanje u vidu neke od funkcija raspodele. Prikazane su i objašnjene jednačine graničnog stanja depasivizacije armature usled karbonizacije i usled dejstva hlorida, prema punoj probabilističkoj metodi i metodi parcijalnih koeficijenata sigurnosti. Osnovni zaključci o efektima pomenutih deterioracionih procesa izvedeni su na osnovu rezultata dva brojna primera.

Ključne reči: betonske konstrukcije, upotrební vek, deterioracioni proces, korozija usled karbonizacije, korozija usled hlorida, kvantifikacija parametara, depasivizacija, jednačina graničnog stanja.

SUMMARY

SERVICE LIFE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES: PART 2 – VERIFICATIONS FOR DIFFERENT DETERIORATION MECHANISMS

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

The service life design is based on quantifying of the deterioration mechanisms of concrete structures. This paper presents the physical or chemical models for two most important deterioration mechanisms: carbonation induced corrosion and chloride induced corrosion. The basic parameters are quantified on the basis of statistical evaluation of experimental data and field observations. The verification by full probabilistic method and by the partial factor method for limit state: reinforcement depassivation in the case of carbonation induced corrosion and chloride induced corrosion, is presented. The main conclusion about the effects of considered deterioration mechanisms are based on the results of two examples.

Key words: concrete structures, service life, deterioration mechanism, carbonation induced corrosion, chloride induced corrosion, quantifying of variables, depassivation, limit state function.

MOGUĆNOST MODELIRANJA SVOJSTAVA BETONA U FUNKCIJI POVEĆANJA TRAJNOSTI

Dragica JEVTIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.5.001.575:691.32 = 861

1 UVOD

Trajnost betona i betonskih konstrukcija ostvaruje se pravilnim projektovanjem konstrukcija, odgovarajućim izborom svih komponentnih materijala u okviru betona, kao i pravilnim izvođenjem i održavanjem konstrukcija. Drugim rečima, betonske konstrukcije treba projektovati tako da se u očekivanim - poznatim uslovima konkretne sredine obezbedi dovoljna sigurnost i upotrebljivost bez visokih troškova održavanja i popravke. Traženo svojstvo trajnosti betona zavisi svakako od veka upotrebljivosti konstrukcije, od mogućeg budućeg načina korišćenja konstrukcije, od posebnih zaštitnih mera, planiranog održavanja tokom upotrebe kao i od eventualnog otkazivanja u posebnim lokalnim uslovima. U praksi, postignut nivo trajnosti betona i betonskih konstrukcija zavisi od simultanog delovanja ovih, navedenih faktora. Analitičko predviđanje veka upotrebljivosti konstrukcija bazira na procesima degradacije materijala u konkretnoj korozionoj sredini, a korozione sredine su, pak, podeljene na više stepena izloženosti s obzirom na vrstu i karakter oštećenja. Tako se sa priličnom tačnošću može izraditi matematički model veka upotrebljivosti konstrukcije, koji će obuhvatiti sve relevantne faktore (potrebe korisnika, uzroke degradacije, mehanizme dejstva, prethodna ispitivanja, izlaganja i procene). Postignuti nivo trajnosti betona u praksi je uvek proizvod više faktora: projektnog rešenja, primenjenih materijala, načina izvođenja i kontrole kvaliteta kao i strategije menadžmenta i održavanja.

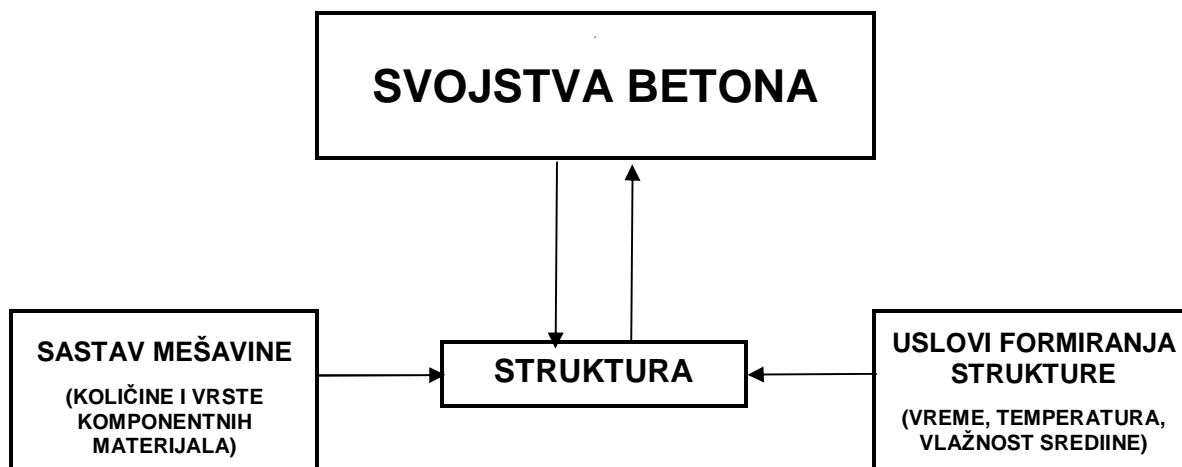
Savremena nauka o materijalima tretira beton kao kompozit tipa aglomerata, tj. kao veštački materijal koji nastaje očvršćavanjem mešavina vode i različitih materijala tipa agregata (granulata, materijala za ispunu, inertnih materijala) i raznih veziva. Kombinovanje komponentnih materijala, u ovom slučaju, podrazumeva njihovo međusobno spajanje u jedan sistem, ne putem nekih mehaničkih spojnih sredstava, već isključivo uspo-

stavljanjem određenih atomskih veza, odnosno dejstvom različitih međumolekulskih sila. Svojstva betona u opštem slučaju su funkcija izvanredno velikog broja uticajnih faktora. Ona zavise od karakteristika primenjenih komponenata - agregata, cementa, vode i eventualno primenjenih dodataka betonu, od kvantitativnih odnosa ovih materijala u masi svežeg betona, od niza tehnoloških faktora, od postupka izrade konkretnog betonskog elementa, od uslova eksploatacije itd. Međutim, bez obzira na kompleksnost pitanja o kojima je reč, danas je nepobitno utvrđeno da najveći broj svojstava betona, i to ne samo betona u očvrslom stanju već i svežeg betona, zavisi od ostvarene strukture. S druge strane, pak, dosadašnja istraživanja na ovom polju ukazuju da struktura svežeg i očvrslom betona, osim od upotrebljenih komponenata, zavisi i od uslova pod kojima se to formiranje odvija, tj. da na formiranje strukture bitno utiču parametri vreme, temperatura i vlažnost sredine. Napred iskazana zavisnost "sastav-struktura - svojstva betona", koja načelno važi kako za svež tako i za očvrslu beton, a koja predstavlja i osnovu tzv. strukturalističkog koncepta teorije i tehnologije betona, može se šematski prikazati na način dat na slici 1, [1].

Betonske konstrukcije izložene su u eksploataciji različitim destruktivnim uticajima koji delujući na konstruktivne materijale - beton i armaturu - bitno opredeljuju vek trajanja objekata. To znači da se tokom eksploatacije objekata u pojedinim sredinama, ove sredine mogu ponašati agresivno u odnosu na date objekte, tako da u opštem slučaju, kao rezultat interakcije sredina-objekat, može da dođe do pojave vrlo značajnih oštećenja, pa i potpunih razaranja konstrukcija. Ovakve pojave se, bez obzira na mehanizam njihovog nastanka, najčešće definišu opštim nazivom **korozija**. Ukupni efekti navedenih destruktivnih procesa, dakle, zavise od karakteristika predmetne agresivne sredine, ali, isto tako, oni su i funkcija unutrašnje otpornosti upotrebljenih materijala (betona i čelika).

Kada je reč o betonskim konstrukcijama može se reći da one u najvećem broju slučajeva mogu da budu

Adresa autora:
Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu,
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija



Sl. 1. Funkcionalna zavisnost svojstva betona - sastav - struktura

tako koncipirane (po konstrukcijskom rešenju i upotrebljenim materijalima) i izvedene, da poseduju sopstvenu (unutrašnju) otpornost prema pojedinim agresivnim uticajima. To znači da se na području betonskih konstrukcija samo u retkim i specifičnim slučajevima moraju primenjivati određena rešenja spoljašnje zaštite konstrukcija, što podrazumeva korišćenje nekih posebnih zaštitnih materijala (površinski premazi, oblaganja i dr.). Međutim, da bi se, u svakom konkretnom slučaju, mogla doneti odluka o izvođenju ili neizvođenju ovih posebnih zaštita, treba u potpunosti determinisati karakteristike date sredine, ali, osim toga, treba i potpuno ovladati funkcijom korozione otpornosti betona, kao i funkcijom korozione otpornosti armature - čelika. Pod ovim se u opštem slučaju podrazumeva poznavanje niza uticajnih parametara, a to su u opštem slučaju:

- hemijske, fizičke i mineraloške karakteristike agregata,
- hemijske, fizičke i mineraloške karakteristike cementa, kao i hemijsko-mineraloške karakteristike odgovarajućeg cementnog kamena,
- zavisnost između sastava betonske mešavine i svojstava očvrslag betona (uticaj agregata, cementa, vode i eventualnih dodataka betonu na njegova fizičko-mehanička i druga svojstva),
- makro i mikrostruktura očvrslag betona,
- eventualni defekti i nehomogenosti strukture betona u okviru konstrukcijskih elemenata,
- mehanizam korozije čelika i korozione otpornosti pojedinih vrsta armature.

Zaštita materijala od korozije može da se obezbedi na više načina, pri čemu u opštem slučaju, metode zaštite mogu da budu neposredne i posredne. U neposredno sprovođenje zaštite, na primer, ubraja se već samo izvođenje konstrukcija od materijala otpornih na sredine u kojima se gradi. Pod posrednim metodama zaštite, pak, podrazumeva se svaka druga radnja koja ima za cilj povećanje trajnosti osnovnog materijala upotrebom proizvoda neke druge vrste.

Na osnovu svega napred izloženog može se izvesti zaključak da trajnost betona i betonskih konstrukcija zavisi od izvanredno mnogo uticajnih faktora. Međutim, bez obzira na kompleksnost pitanja o kome je reč, kao nesumnjiva ipak stoji činjenica da trajnost direktno zavisi

od karakteristika upotrebljenih materijala (u slučaju cementa to znači od prirode produkata hidratacije), kao i od ostvarene strukture očvrslag betona [21].

2 KOMPONENTNI MATERIJALI I NJIHOVA KOROZIONA OTPORNOST

Prema evropskom standardu EN 12620 Agregat za beton, korišćeni agregat može biti prirodan, prerađen (veštački ili recikliran). Recikliran agregat je onaj agregat koji je nastao iz prerade neorganskog materijala i koji je prethodno korišćen u izgradnji.

Koroziona otpornost, pa samim tim i trajnost agregata je, kao i mnoge druge karakteristike, funkcija vrste konkretnog stenskog materijala. U tabeli 1. [2] prikazana su svojstva nekih najrasprostranjenijih vrsta kamenih materijala koji imaju primenu kao agregati za beton. Na osnovu prezentiranih karakteristika moguće je dati dosta pouzdanu ocenu njihove trajnosti u određenim uslovima eksploatacije.

Polazeći od svojstava stenskih materijala o kojima je ovde reč, može se uvek definisati i koroziona otpornost agregata. Ovo je u opštem slučaju moguće stoga što agregat, bez obzira da li se radi o prirodnom (rečnom, morskom) ili drobljenom, u suštini predstavlja skup manje-više istovrsnih čestica - fragmenata pojedinih stenskih masa. To znači da, načelno govoreći, trajnost agregata u okviru betona u prvom redu zavisi od otpornosti pojedinih zrna na delovanje određenih agresivnih agenasa. Međutim, kako nas u predmetnom slučaju otpornost agregata na delovanje pojedinih agresivnih faktora interesuje samo onoliko koliko je to od značaja za trajnost samog betona, zaključci o trajnosti betona nikada se ne mogu izvlačiti isključivo na bazi ispitivanja u okviru kojih će se determinisati mineraloško-petrografski sastav konkretnog agregata. Trajnost betona, vezano za prisustvo agregata u njemu, biće u opštem slučaju i funkcija niza drugih faktora, kao što su sadržaj organskih materija, upijanje vode, sadržaj hemijski štetnih primesa, sadržaj grudvi gline, sadržaj sitnih čestica, obavljenost zrna krupnog agregata prašinstim (glinovitim) česticama, postojanost na dejstvo mraza, ukupni sadržaj sumpora, hlorida i dr. Prema tome,

Tabela 1. Karakteristike nekih vrsta prirodnog kamena, [2]

Karakteristika	Vrsta kamena								
	Granit	Gabro	Andezit	Bazalt	Krečnjak	Dolomit	Peščar	Kvarcit	Mermer
Zapreminska masa (kg/m ³)	2500-2800	2700-3200	2200-2700	2600-3000	1800-2800	1800-2700	2000-2900	2600-2700	2800-2900
Poroznost (%)	0,2-3,5	0,3-1,5	0,5-5,5	0,1-1,0	0,4-2,0	0,5-20	1,0-18	0,1-0,5	0,4-2,0
Upijanje vode (%)	0,1-0,5	0,1-1,0	0,1-0,5	0,1-0,5	0,5-4,0	0,5-4,0	0,5-4,0	0,1-0,5	0,1-0,5
Skupljanje - bubrenje (%)	zanemarljivo	zanemarljivo	zanemarljivo	zanemarljivo	do 0,1	0,1-0,2	do 0,07	zanemarljivo	zanemarljivo
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	100-250	150-250	80-220	100-200	15-200	100-200	30-300	250-400	60-300
Otpornost na habanje po Beme-u (cm ³ /50 cm ²)	< 10	< 8	< 10	< 10	30-40	30-40	30-100	20-40	< 5
Koeficijent termičke dilatacije (1/°C x 10 ³)	0,2-1,2	0,4-1,0	0,4-1,1	0,4-1,0	0,1-1,2	0,5-1,2	1,0-1,2	0,8-1,3	0,1-1,5
Postojanost na mrazu	dobra do odlična	dobra do odlična	dobra do odlična	dobra do odlična	slaba do vrlo dobra	slaba do vrlo dobra	slaba do vrlo dobra	dobra do odlična	dobra do odlična
Otpornost na atmosferske uticaje	dobra	dobra	dobra	dobra	rdava do dobra	dobra	rdava do dobra	vrlo dobra	rdava do dobra
Otpornost prema kiselinama	dobra	dobra	dobra	dobra	dobra	uglavnom slaba	dobra (sem krečnjačkog tipa)	vrlo dobra	slaba
Postojanost na temperaturnim promenama	dobra	dobra	dobra	dobra	dobra do 800°C	dobra do 800°C	uglavnom dobra	puca na cca 500°C	dobra do 800°C

trajnost betona u zavisnosti od korozione otpornosti i drugih svojstava agregata je veoma složena funkcija i ona se ne može zadovoljiti isključivo usvajanjem u mineraloško-petrografskom pogledu povoljnog agregata. Da bi se dobio beton zahtevane trajnosti, potrebno je, u okviru rešavanja problema, odrediti i celokupan kompleks ostalih karakteristika agregata, koje u suštini predstavljaju njegove uslove kvaliteta propisane odgovarajućim standardima.

Agregat je značajan u vezi trajnosti betona i sa aspekta odvijanja tzv. alkalno-agregatnih reakcija u očvrslom betonu čije posledice su toliko ozbiljne - manifestuju se najčešće u obliku potpunog razaranja betona.

U vezi sa prisustvom agregata u betonu su i potencijalne mogućnosti razvijanja destruktivnih procesa u betonu usled termičke nekompatibilnosti agregata i cementnog kamena, o čemu se takođe mora voditi računa.

Novi evropski standard za cement ENV 197-1 (2000) [3] daje klasifikaciju cementa prema tabeli 2.

Kao što se vidi cement (27 običnih tipova) je podeljen u pet kategorija:

- CEM I portland cement,
- CEM II portland-kompozitni cement,
- CEM III metalurški cement,
- CEM IV pucolanski cement, i
- CEM V kompozitni cement.

U okviru tabele 2, u sastav cementa, kao što se vidi, mogu da uđu granulisana zgura visoke peći (oznaka S), silikatna prašina - čađ (oznaka D), prirodni (oznaka P) i industrijski (oznaka Q) pucolani, leteći pepeo - silikatni (oznaka V) i karbonatni (oznaka W), sagoreli škrljac (oznaka T), kao i krečnjak (oznaka L).

Koroziona otpornost cementnog kamena načelno je

funkcija dva osnovna faktora - prirode produkata hidratacije i ostvarene strukture (poroznosti) cementnog kamena koji se formira tokom procesa hidratacije [4], [5], [6].

Ne ulazeći dublje u vrlo složen kompleks pitanja hemijske otpornosti cementa, ovde će se samo istaći da u reakcije sa spoljašnjim hemijskim agensima najčešće stupaju sastojci cementnog kamena Ca(OH)₂ i 3CaO·Al₂O₃·6H₂O (C₃AH₆) i da se, s obzirom na mehanizam agresivnog delovanja, korozija cementnog kamena u betonu može svesti na tri osnovna oblika:

– (1) rastvaranje i ispiranje kalcijumhidroksida (korozija usled delovanja tzv. mekih voda),

– (2) obrazovanje lakorastvorljivih jedinjenja pri međudejstvu hemijskih agenasa i cementnog kamena - rastvaranje dobijenih jedinjenja i njihovo ispiranje (kiselinska i magnezitna korozija, korozija usled delovanja mineralnih đubriva),

– (3) obrazovanje u porama cementnog kamena takvih jedinjenja koja zauzimaju veći prostor od polaznih supstanci, što izaziva pojavu unutrašnjih napona u cementnom kamenu i razaranje njegove strukture (sulfatna korozija i alkalno-agregatna reakcija).

Oblici korozije pod (1) mogu da se svedu na manju meru, pa čak i da se potpuno eliminišu upotrebom cemenata sa nižim sadržajem klinker minerala C₃S. Ispitivanja pokazuju da se u slučaju primene portland cementa najbolji rezultati dobijaju ako je sadržaj ovog minerala u cementu ispod 50%. Međutim, isto tako zadovoljavajući rezultati dobijaju se i kod primene cemenata sa preko 30% pucolanskih dodataka, pa se stoga u našim uslovima za rešavanje ovakvih problema mogu preporučiti metalurški i pucolanski cementi, metalurški cementi sa dodatkom pucolana, kao i aluminatni cementi.

Tabela 2. Sastav i oznake cementa prema EN 197-1:2000

Sadržaj u procentima mase¹⁾

Vrsta cementa	Naziv	Oznaka	Klinker K	Granulisana zgura visoke peći S	Silikatna čađ D ²⁾	Pucolan		Leteći pepeo		Sagoreli škriljac T	Krečnjak L	Manji dodatni sastojci ²⁾	
						prirodni P	industrijski Q ⁴⁾	silikatni V	karbonatni W				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
I	Portland cement	I	95 do 100	—	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5	
II	Portland cement sa dodatkom zgure	II/A-S	80 do 94	6 do 20	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5	
		II/B-S	65 do 79	21 do 35	—	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom silikatne čađi	II/A-D	90 do 94	—	6 do 10	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom pucolana	II/A-P	80 do 94	—	—	—	6 do 20	—	—	—	—	—	0 do 5
		II/B-P	65 do 79	—	—	—	21 do 35	—	—	—	—	—	0 do 5
		II/A-Q	80 do 94	—	—	—	—	6 do 20	—	—	—	—	0 do 5
		II/B-Q	65 do 79	—	—	—	—	21 do 35	—	—	—	—	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom letećeg pepela	II/A-V	80 do 94	—	—	—	—	—	6 do 20	—	—	—	0 do 5
		II/B-V	65 do 79	—	—	—	—	—	21 do 35	—	—	—	0 do 5
		II/A-W	80 do 94	—	—	—	—	—	—	6 do 20	—	—	0 do 5
		II/B-W	65 do 79	—	—	—	—	—	—	21 do 35	—	—	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom sagorelog škriljca	II/A-T	80 do 94	—	—	—	—	—	—	—	6 do 20	—	0 do 5
		II/B-T	65 do 79	—	—	—	—	—	—	—	21 do 35	—	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom krečnjaka	II/A-L	80 do 94	—	—	—	—	—	—	—	—	6 do 20	0 do 5
		II/B-L	65 do 79	—	—	—	—	—	—	—	—	21 do 35	0 do 5
	Portland-kompozitni cement	II/A-M	80 do 94	(————— 6 do 20 ⁵⁾ —————)									
II/B-M		65 do 79	(————— 21 do 20 ⁵⁾ —————)										
III	Metalurški cement	III/A	35 do 64	36 do 65	—	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5
		III/B	20 do 34	66 do 80	—	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5
		III/C	5 do 19	81 do 95	—	—	—	—	—	—	—	—	0 do 5
IV	Pucolanski cement	IV/A	65 do 89	—	(————— 11 do 35 —————)			—	—	—	—	—	0 do 5
		IV/B	45 do 64	—	(————— 36 do 55 —————)			—	—	—	—	—	0 do 5
V	Kompozitni cement	V/A	40 do 64	18 do 30	—	(————— 18 do 30 —————)		—	—	—	—	—	0 do 5
		V/B	20 do 39	31 do 50	—	(————— 31 do 50 —————)		—	—	—	—	—	0 do 5

1) Vrednosti u tabeli se odnose na čestice cementa, bez gipsa i drugih aditiva.
2) Minorni dodatni sastojci mogu biti punilo ili bilo koji od glavnih sastojaka osim ako su uključeni kao glavni sastojci cementa.
3) Količina silikatne čađi je ograničena do 10 %.
4) Količina zgure koja nije iz visoke peći ograničena je do 15 %.
5) Količina punila je ograničena do 5 %.

Ako je reč o korozionim razaranjima usled delovanja agenasa navedenih pod (2), treba istaći da ovi agensi prvenstveno deluju na kalcijumhidroksid u okviru cementnog kamena, ali isto tako i na pojedine silikate

kalcijuma, koji su takođe konstitutivni elementi cementnog kamena. S obzirom da se kiselinna korozija, magnezitna korozija i korozija pod dejstvom mineralnih đubriva odvijaju po identičnom mehanizmu, sva tri

navedena tipa korozije mogu se, kao u prethodnom slučaju, sprečiti primenom cementa sa niskim procentom minerala C_3S , odnosno primenom cementa sa većim sadržajem pucolanskih dodataka.

Sulfatna korozija, koja se odvija po mehanizmu opisanom pod (3) je vrlo česta u morskoj vodi, a može da se javi pod uticajem podzemnih voda, kao i nekih otpadnih industrijskih voda. Ovde samo treba napomenuti da morska voda, koja inače sadrži značajnu količinu sulfatnih jona, ne deluje toliko agresivno na cementni kamen kao neke obične sulfatne vode. Razlozi za ovo leže u činjenici da su u morskoj vodi prisutni i hlor-joni, pa u takvoj kombinaciji dolazi do usporenih reakcija sulfata [7], [8].

Za borbu protiv sulfatne korozije primenjuju se cementi sa niskim sadržajem minerala C_3A . To su u našim uslovima sledeći tipovi cementa: sulfatootporni portland cement, sulfatootporni metalurški cement, aluminatni cement, supersulfatni cement.

Mada hemijska otpornost određenog cementa može potpuno pouzdano da se determiniše samo putem odgovarajućih laboratorijskih ispitivanja (koja su dugotrajna i koja bi u principu trebalo da se izvode i na betonima u okviru kojih će se koristiti predmetni cementi), globalna predstava o hemijskoj otpornosti cementa može da se dobije i na osnovu hemijskih analiza putem kojih će se utvrditi sadržaji jedinjenja SiO_2 , Al_2O_3 , CaO i dr. u nehidratisanom cementu. Na osnovu poznavanja količina ovih supstanci može se izračunati indeks hidrauličnosti cementa ili tzv. Vikatov indeks, koji predstavlja odnos kisele i bazične frakcije u cementu:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO} \quad (1)$$

Što je vrednost ovog indeksa veća, smatra se da je otpornost cementa prema hemijskoj agresiji veća. Na primer, kod aluminatnog cementa, koji se u opštem slučaju smatra za hemijski veoma otporan, vrednost I je uvek veća od 1,0. Međutim, kod portland cementa ("čistog") I je skoro uvek ispod 0,5, pa je portland cement po pravilu najneotporniji od svih cementa u odnosu na hemijske uticaje. Što se, pak, tiče cementa sa dodacima zgure ili/i pucolana, oni imaju $0,5 < I < 1,0$, što znači da su oni otporniji od portland cementa, ali ne toliko otporni kao aluminatni cement [11].

Na osnovu prethodnih razmatranja, koja su se odnosila na korozionu otpornost agregata i cementnog kamena, mogu se izvesti i zaključci u vezi sa korozionom otpornošću betona. Naime, eksperimentalna ispitivanja pokazuju da ova otpornost nesumnjivo zavisi od pojedinačnih korozionih otpornosti agregata i cementnog kamena (od njihovog hemijskog sastava i strukturnih karakteristika), ali da je ona, isto tako, i funkcija ostvarene strukture betona, shvaćenog u smislu kompozita kod koga agregat i cementni kamen predstavljaju samo osnovne makrostrukturne komponente.

3 PARAMETRI STRUKTURE BETONA OD UTICAJA NA TRAJNOST

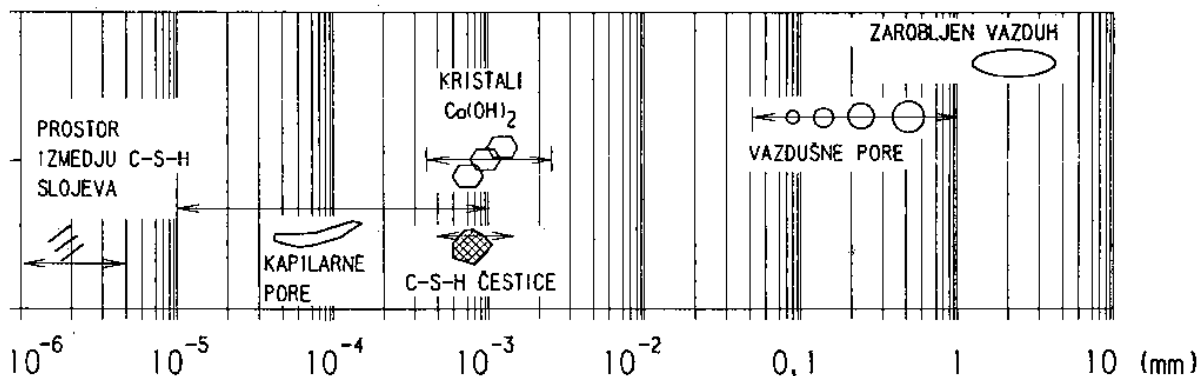
Struktura očvrstlog betona je, načelno, rezultat dostizanja određenog stepena hidratacije cementa, tj. rezultat dovoljnog očvršćavanja betonske mešavine. Tok procesa formiranja strukture betona i njegovo trajanje zavise od mnogih faktora: od sastava svežeg betona, svojstva cementa, od eventualno prisutnih aditiva i dr.

Strukturu betona u opštem slučaju čine:

- makrostruktura - struktura dvokomponentnog sistema u čiji sastav ulaze malterska komponenta i krupan agregat
- mikrostruktura tj. struktura cementnog kamena i
- prelazna (tranzitna) zona između agregata i cementnog kamena.

U mikrostrukтури betona javljaju se strukturni elementi koji u najvećem procentu sačinjava cementni gel - skup submikrokristalnih čestica uglavnom hidrosilikata kalcijuma. Pored ovoga, u cementnom kamenu su prisutni i relativno krupni kristali kalcijum hidroksida, nehidratirana ili delimično hidratirana zrna cementa, kao i izvesna količina etringita. U cementnom kamenu su prisutni i "prazni" prostori - pore u gelu, kapilarne pore i šupljine i mehurići vazduha zaostali ili namerno uvučeni u cementni kamen. Na slici 2. date su dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona prema [1].

U ukupnoj poroznosti betona p , učestvuju kapilarna, gelska (osnovna poroznost) i zaostala poroznost Δp koja je posledica različitih faktora, kao što su neefikasno ugrađivanje, primena aeranata i drugo. Kapilarna i gelska poroznost mogu da se napišu u obliku:



Sl. 2. Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona [1]

– kapilarna poroznost

$$p_k = 0,1 m_c \left(\frac{m_v}{m_c} - 0,4 a_h \right) \%, \text{ za } \frac{m_v}{m_c} \geq 0,4 \alpha_h \quad (2)$$

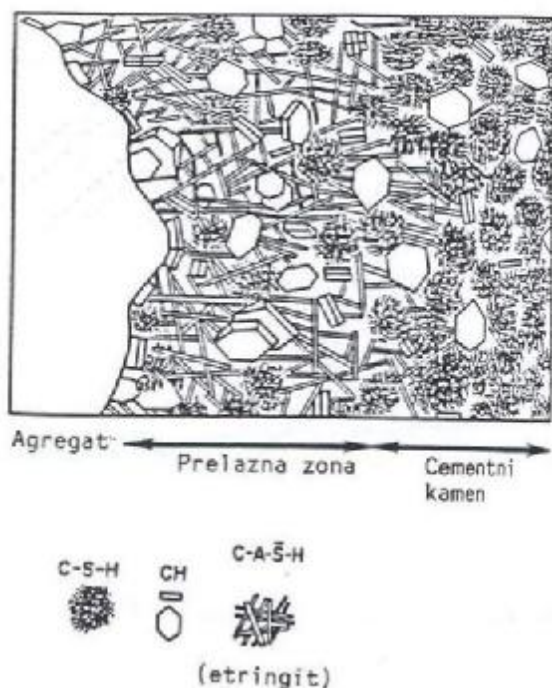
– pore u gelu

$$p_G = 0,016 a_h m_c + 0,006 a_h m_c = 0,022 a_h m_c (\%) \quad (3)$$

gde m_c označava količinu cementa po kubnom metru betona, a_h stepen hidratacije cementa, a m_v/m_c vodocementni faktor.

Ispisani izrazi na vrlo jasan način pokazuju kako se može modelirati mikrostruktura betona, odnosno kako se može regulisati njegova poroznost, pa samim tim i njegova svojstva, uključujući tu i trajnost betona. Kao što se vidi iz datih izraza, na gelsku poroznost se može vrlo malo uticati, pa se ona praktično mora prihvatiti kao neizbežna. Međutim, ostala dva sabirka u izrazu za ukupnu poroznost betona omogućavaju da se poroznost menja u vrlo širokim granicama i to u funkciji vodocementnog faktora, funkciji efikasnosti ugrađivanja, odnosno stepena zbijanja - kompaktiranja betona, kao i eventualno u funkciji primene nekog postupka "namernog" uvlačenja vazduha u strukturu betona. Korišćenjem svih navedenih mogućnosti, uvek se može dobiti takav nivo ukupne poroznosti koji će obezbeđivati ostvarivanje zahtevanog nivoa kvaliteta betona.

Kontaktni sloj između zrna agregata i cementnog kamena veoma je značajan za zajednički rad ovih mikrostrukturnih komponenata u sklopu ukupne mase betona. Širina ovog kontakta obično iznosi 0,03-0,06 mm (2-3 prečnika zrna cementa). Ova kontaktna zona se, po sastavu i svojstvima, bitno razlikuje od ostalog cementnog kamena, (sl. 3 i sl. 4) [14], [18].

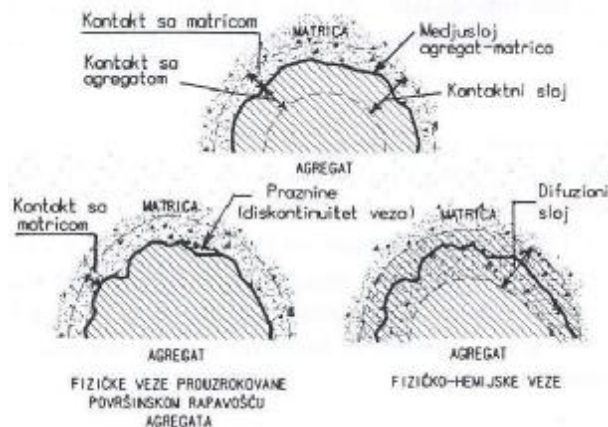


Sl. 3. Šematski prikaz kontaktne zone između zrna agregata i cementnog kamena

Povezivanje - srastanje zrna agregata sa cementnim kamenom tesno je povezano sa migracijom kalcijum-hidroksida koji se u vrlo velikom obimu deponuje na površinama zrna agregata i tu delom kristališe, a delom prelazi u kalcijumkarbonat. Ovi produkti deponovani na površinama zrna agregata uslovljavaju pojavu vrlo značajnih Vandervalsovih sila, koje predstavljaju osnovni faktor veze (athezije) agregat - cementni kamen. Ispitivanja su pokazala da kontaktna zona između agregata i cementnog kamena ima uvek nešto veću poroznost od ostale mase cementnog kamena, pa stoga ovu zonu uvek karakteriše veća vodopropustljivost u odnosu na sam cementni kamen i agregat. Kako se voda uvek kreće linijom najmanjeg otpora i kako se u okviru betona najintenzivnije kretanje vode zapaža baš u ovoj zoni, ova zona se stoga često naziva i tranzitnom zonom. S obzirom na fenomen kretanja vode kroz beton, kontaktna zona je posebno važna sa gledišta trajnosti betona; u okviru nje uvek su prisutni najveći pritisci leda (ako dođe do smrzavanja vode u pornom prostoru betona), a takođe su najintenzivnija i hemijska razaranja (ukoliko je u pornom prostoru prisutan neki tečan agresivni medijum).

Sa praktičnog aspekta, čvrstoća veze agregat-cementni kamen zavisi od prirode agregata, od njegove eventualne poroznosti, od hrapavosti površine, kao i od čistoće površine zrna. Ova veza ima velikog značaja u odnosu na pojedina svojstva betona (čvrstoća, vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza, termička stabilnost, hemijska otpornost i dr.), što je i razumljivo s obzirom na njenu povećanu poroznost, pa samim tim i niže mehaničke karakteristike.

Kako se danas uglavnom proizvode cementi sa mineralnim dodacima (zgura, pucolan), interesantno je na ovom mestu prikazati strukturu betona sa ovim dodacima.



Sl. 4. Šematski prikaz međuzavisnosti između agregata i cementne paste u kontaktnoj zoni

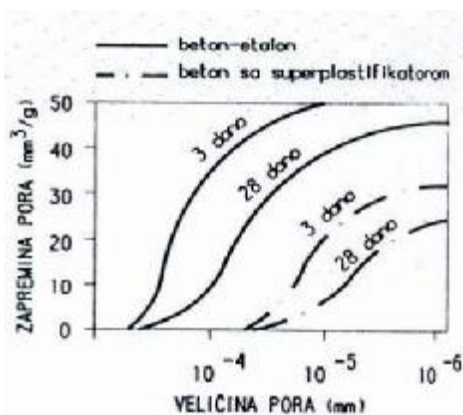
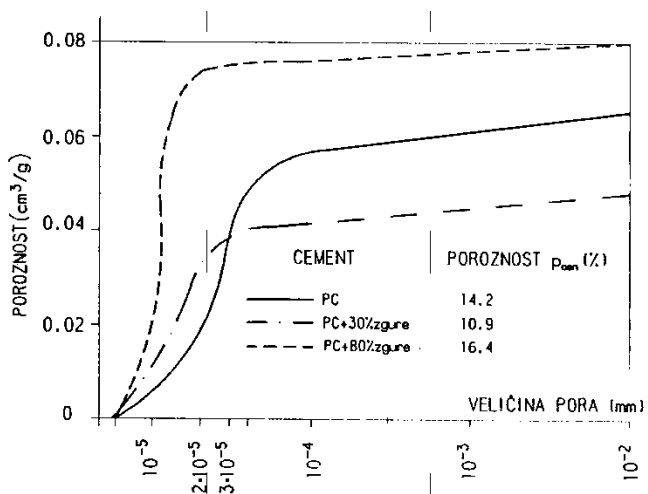
Mikrostruktura betona sa cementima sa dodatkom zgure u principu je identična mikrostrukturi betona na bazi čistog portland cementa. Ispitivanja međutim, pokazuju da se pri primeni zgure kao dodatka cementu menja dimenzionalni raspored pora tako da se dobija veći procenat sitnijih pora. Pri ovome, međutim, kod cementa sa dodatkom zgure do 30% osnovna poroznost se smanjuje u odnosu na slučaj primene čistog portland cementa, dok se pri većim količinama zgure osnovna poroznost betona povećava u odnosu na beton sa čistim portland cementom. O ovome vrlo ubedljivo svedoče rezultati ispitivanja čiji se dijagram dobijen ispitivanjima daje na sl. 5 [17].

Za objašnjenje ovog fenomena neki autori uzimaju veliku reaktivnost zgure koja reaguje sa Ca(OH)_2 , koji se stvara pri hidrataciji portland cementa, uz obrazovanje amornog kalcijumhidrosilikata.

Pri primeni dodatka betonu tipa superplastifikatora takođe se značajno menja raspored pora u mikrostrukturi betona, odnosno u cementnom kamenu. Prema ispitivanjima Mora i Mehte [16] primena superplastifikatora smanjuje procenat krupnijih pora povećavajući u izvesnoj meri sadržaj sitnih pora. Navedeni autori klasifikuju pore na krupne i sitne s obzirom na granicu od

10^{-4} mm, pri čemu po njima, krupne pore predstavljaju opasne pore koje snižavaju čvrstoću betona, a povećavaju njegovu paropropustljivost, vodo-propustljivost i dr. Rezultati ispitivanja ovih autora daju se u tabeli 3, koja jasno pokazuje da se pri starosti od 28 dana sadržaj krupnih pora u cementnom kamenu pri primeni superplastifikatora skoro dva puta smanjuje.

Isto tako, Monosi i Kolepardi [15] daju kumulativnu zapreminu pora u funkciji radijusa pora i to za cementnu pastu uz primenu superplastifikatora kao i za čistu cementnu pastu. Sa slike 6 može se videti da se dodatkom 2,5% superplastifikatora ukupna zapremina, kao i veličine pora značajno smanjuju, tako da superplastificirani cement u starosti od 3 dana ima manju poroznost nego čist (bez superplastifikatora) u starosti od 28 dana. Naravno, ovde se radilo o velikom smanjenju vodocementnog faktora od 0,55 kod cementne paste bez superplastifikatora, na 0,32 uz upotrebu 2,5% superplastifikatora, a pri količini cementa od 400 kg/m^3 . Ovo smanjenje sadržaja vode dovodi do smanjenja sadržaja kapilarnih pora i uopšte zapremine pora u cementnom kamenu, što cementni kamen čini gušćim i prouzrokuje porast čvrstoće.



Sl. 5. Uticaj vrste cementa na dimenzionalni raspored pora [17]

Sl. 6. Uticaj superplastifikatora na raspored pora [15]

Tabela 3. Uticaj superplastifikatora na veličinu pora [16]

Tipovi cementnih pasta	Zapremina kapilarnih pora, cm^3/g			Pore, %	
	Ukupna zapremina	Sitne pore	Krupne pore	Krupne	Sitne
Referentna pasta	0,0720	0,0433	0,0287	40	60
Pasta sa dodatkom melamin kondenzata	0,0860	0,0663	0,0197	23	77
Pasta sa dodatkom naftalin kondenzata	0,0870	0,0692	0,0178	20	80

Alkalnost betona predstavlja vrlo efikasnu zaštitu čelika od korozije. To znači da ova zaštita zavisi kako od uslova sredine, tako i od veličina zaštitnih slojeva betona i strukture betona u okviru ovih slojeva. Korozija može da se obavlja bilo onda kada su ovi slojevi oštećeni (prsline), bilo u slučajevima kada oni imaju suviše veliku poroznost, ili kada su izvedeni od betona sa neadekvatnim (hemijski neotpornim) cementom. S obzirom na opasnost od korozije, izbor čelika predstavlja vrlo važan činilac trajnosti konstrukcija od armiranog i prednaprnutog betona. Kao veoma osetljiva na koroziju smatra se sva armatura, bez obzira o kakvim je čelicima reč, sa prečnicima $f \leq 4$ mm. Pored ovoga, na koroziju su vrlo osetljivi termički obrađeni čelici, kao i hladno obrađeni čelici, koji su stalno izloženi naponima zatezanja većim od 400 MPa. Svi ostali armaturni čelici, pak, mogu se smatrati kao manje osetljivi na koroziju [3].

Pri izboru materijala za beton takođe treba voditi i računa o zaštiti čelika. Najbolju zaštitu predstavlja beton na bazi portland cementa ili portland cemenata sa umerenim količinama dodataka zgure ili/i pucolana. Međutim, u slučajevima primene cemenata sa visokim procentima pucolanskih dodataka, vrlo često može nakon hidratacije da se dobije nedovoljna količina kalcijumhidroksida koja će obezbeđivati potreban stepen alkalnosti betona, pa u takvim slučajevima beton neće predstavljati dovoljno efikasnu zaštitu za armaturu.

Prema tome, prilikom izrade određenog elementa ili konstrukcije vrlo je bitno da se upotrebi dovoljno velik zaštitni sloj, da se usvoji dobar granulometrijski sastav agregata, da se odabere odgovarajući cement kako po vrsti tako i po količini i da se usvoji što je moguće niži vodocementni faktor. Naravno, pri ovome uvek treba voditi računa o mogućnosti pravilnog ugrađivanja (zbijanja, kompaktiranja) sveže betonske mase, kao i o negovanju betona koje sledi nakon ugrađivanja. Nega je vrlo važan element postupka zaštite, pošto ukoliko ona nije zadovoljavajuća, u betonu, usled skupljanja, mogu da se jave prsline koje otvaraju put za agresiju. Ukoliko dođe do ovoga, otpočne proces korozije, narušiče se veza između betona i čelika, čime će nosivost konstrukcije biti znatno ugrožena. Trajnost konstrukcije u značajnoj meri zavisi od debljine i kvaliteta zaštitnog sloja betona oko armature.

4 KLASSE IZLOŽENOSTI PREMA EN 206-1

Evropski standard EN 206-1:2000, "Beton-Deo 1: Specifikacija, svojstva, proizvodnja i kontrola saglasnosti", za razliku od važećeg Pravilnika BAB 87, veliku pažnju posvećuje danas vrlo aktuelnom aspektu trajnosti betona i betonskih konstrukcija [9]. U poglavlju "Klasifikacija" na prvom mestu i vrlo precizno definišu se Klase izloženosti prema delovanju sredine. Ove klase se, u opštem slučaju, rangiraju na bazi opisa uslova agresivnosti (korozivnosti) sredina i u sklopu toga uzimaju se u obzir i stepeni vlažnosti pojedinih sredina. Mada klase izloženosti usvojene u predmetnom standardu još uvek ne predstavljaju "klase trajnosti betona", ipak pristup o kome je reč nesumnjivo predstavlja vrlo značajan napredak na području rešavanja pitanja trajnosti betona i betonskih konstrukcija.

Napred pomenute klase izloženosti su predstavljene u okviru tabele 4, a podeljene su na šest kategorija i to na sledeći način:

1. Nema rizika od korozije ili agresije (klasa sa oznakom X0)
2. Korozija prouzrokovana karbonatizacijom (klase sa oznakama XC1, XC2, XC3 i XC4)
3. Korozija prouzrokovana hloridima koji ne potiču iz morske vode (klase sa oznakama XD1, XD2 i XD3)
4. Korozija prouzrokovana hloridima iz morske vode (klase sa oznakama XC1, XC2 i XC3)
5. Zamrzavanje/odmrzavanje sa ili bez agenasa za odmrzavanje (klase sa oznakama XF1, XF2, XF3 i XF4)
6. Hemijska izloženost (klase sa oznakama XA1, XA2 i XA3).

Uz navedene klase izloženosti pomenuti dokument sadrži i maksimalan sadržaj hlorida u betonu zavisno od toga da li se radi o armiranom ili prednaprnutom betonu (tabela 5), kao i granične vrednosti hemijske agresivnosti prirodnog tla i podzemne vode što se ovde neće prikazivati.

Za određivanje sadržaja hlorida u betonu (prema tabeli 3) mora se koristiti proračun baziran na sumiranju maksimalno dozvoljenih sadržaja hlorida u svim materijalima za spravljanje betona.

Betonske konstrukcije u nekim slučajevima mogu biti izložene delovanju više od jednog uticaja opisanih u tabeli 4, tada je uslove sredine potrebno iskazati kao kombinaciju klasa izloženosti.

Tabela 4 – Klase izloženosti AB prema delovanju sredine

Oznaka klase	Opis uslova sredine	Informativni primeri gde se klase izloženosti mogu primeniti
1 Nema rizika od korozije ili agresije		
X0	Za beton bez armature ili ugrađenog metala: Sve izloženosti sem zamrzavanje/odmrzavanje, habanje ili hemijska agresija	Beton unutar zgrada veoma niske vlažnosti vazduha
2 Korozija prouzrokovana karbonatizacijom		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili druge ugrađene metale izložen vazduhu i vlazi, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način: NAPOMENA Uslovi vlažnosti se odnose na uslove u betonu zaštitnog sloja armature ili drugog ugrađenog metala, ali u mnogim slučajevima, uslovi u zaštitnom sloju betona mogu se smatrati da reflektuju uslove sredine. U ovim slučajevima klasifikacija uslova sredine može biti adekvatna. Ovo se ne odnosi na slučaj kada postoji barijera između betona i okruženja.		

XC1	Suva ili stalno vlažna sredina	Beton unutar zgrada niske vlažnosti vazduha Beton stalno potopljen u vodu
XC2	Vlažna, retko suva sredina	Betonska površina izložena dugotrajnom kontaktu sa vodom Mnogi temelji
XC3	Umereno vlažna sredina	Beton unutar zgrada umerene ili visoke vlažnosti vazduha Spoljašnji beton koji je zaštićen od kiše
XC4	Ciklično vlažna i suva sredina	Betonske površine izložene kontaktu sa vodom, ali ne u okviru klase izloženosti XC2
3 Korozija prouzrokovana hloridima koji ne potiču iz morske vode		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal izložen kontaktu sa vodom koja sadrži hloride, uključujući i so za odmrzavanje, koji ne potiču iz morske vode, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način: PRIMEDBA U vezi sa uslovima vlažnosti vidi takođe odeljak 2 ove tabele		
XD1	Umereno vlažna sredina	Betonske površine izložene hloridima iz vazduha
XD2	Vlažna, retko suva sredina	Plivački bazeni Beton izložen industrijskim vodama koje sadrže hloride
XD3	Ciklično vlažna i suva Sredina	Delovi mostova izloženi prskanju vodom koja sadrži hloride Kolovozi, trotoari Ploče na parkinzima
4 Korozija prouzrokovana hloridima iz morske vode		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal izložen kontaktu sa hloridima iz morske vode ili vazduha koji sadrži so poreklom iz morske vode, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način:		
XS1	Sredina izložena solju iz vazduha ali gde beton nije u direktnom kontaktu sa morskom vodom	Konstrukcije blizu obale ili na obali
XS2	Beton permanetno potopljen u morskoj vodi	Delovi konstrukcija u morskoj vodi
XS3	Zone izložene plimi, kvašenju i prskanju	Delovi konstrukcija u morskoj vodi
5 Zamrzavanje/odmrzavanje sa ili bez agenasa za odmrzavanje		
Kada je beton u vlažnom stanju izložen značajnim ciklusima zamrzavanja/odmrzavanja		
XF1	Umerena zasićenost vodom, bez agensa za odmrzavanje	Vertikalne betonske površine izložene kiši i mrazu
XF2	Umerena zasićenost vodom, sa agensom za odmrzavanje	Vertikalne betonske površine saobraćajnih konstrukcija izložene mrazu i sredstvima za odmrzavanje iz vazduha
XF3	Velika zasićenost vodom, bez agenasa za odmrzavanje	Horizontalne betonske površine izložene kiši i mrazu
XF4	Velika zasićenost vodom sa agensima za odmrzavanje ili morskom vodom	Ploče na putevima i mostovima izložene sredstvima za odmrzavanje Betonske površine izložene direktnom prskanju rastvorima sredstava za odmrzavanje i mrazu Zone kvašenja konstrukcija na morskoj obali izložene mrazu
6 Hemijska izloženost		
Kada je beton izložen hemijskim uticajima iz zemljišta i podzemnih voda, kao što je prikazano u tabeli 2, izloženost će biti klasifikovana kao što je dato dole. Klasifikacija morske vode zavisi od geografske lokacije, tako da važi klasifikacija koja odgovara mestu primene betona.		
NAPOMENA Može biti potrebna posebna studija da bi se definisali relevantni uslovi izloženosti, kada su u pitanju:		
<ul style="list-style-type: none"> - granice izvan onih koje su date u tabeli 5; - druge agresivne hemikalije - hemijski zagađeno zemljište ili voda - velika brzina vode u kombinaciji sa hemikalijama iz tabele 5. 		
XA1	Blaga hemijska agresivnost sredine prema tabeli 5	
XA2	Umerena hemijska agresivnost sredine prema tabeli 5	
XA3	Veoma hemijski agresivna sredina prema tabeli 5	

Tabela 5 – Maksimalan sadržaj hlorida u betonu [9]

Primenjeni beton	Klasa sadržaja hlorida ^a	Maksimalan sadržaj Cl ⁻ po masi cementa ^b
Ne sadrži čeličnu armaturu ili druge ugrađene metale, sa izuzetkom koroziono otpornih ankera za dizanje (elemenata)	Cl 1,0	1,0 %
Sadrži čeličnu armaturu ili drugi ugrađeni metal	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Sadrži čelik za prednaprezanje	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %

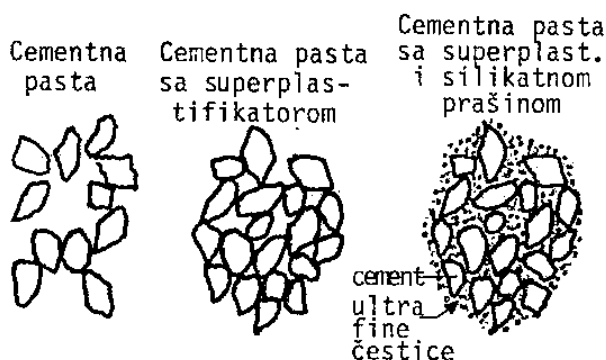
^a Za specifičnu upotrebu betona, klasa koju treba primeniti zavisi od odredaba koje važe na mestu primene betona.

^b Ako se koriste mineralni dodaci tipa II, i ako su oni uzeti u obzir za količinu cementa, sadržaj hlorida se izražava kao procenat jona hlorida, u odnosu na (masu cementa plus ukupna masa mineralnih dodataka) koji su uzeti u obzir.

5 NAČINI POBOLJŠANJA KOROZIONE OTPORNOSTI BETONA

Mere za povećanje trajnosti betona u uslovima date korozione sredine idu u pravcu ostvarenja što veće unutrašnje otpornosti komponentnih materijala kao i što veće kompaktnosti betona.

Na hemijsku otpornost cementnog kamena može se u opštem slučaju uticati i putem regulisanja njegove strukture, a to se može postići izborom optimalnog vodo-cementnog faktora, korišćenjem aditiva tipa plastifikatora ili superplastifikatora (radi smanjenja potrebne količine vode), upotrebom nekih posebnih dodataka (osim onih koji su već eventualno sadržani u cementu) - na primer tzv. silikatne prašine (silica fume videti sliku 7), raznih polimera rastvorljivih ili dispergovanih u vodi (lateks, poliakrilat, polivinilacetat) i dr. U svim ovim slučajevima postižu se efekti povećanja gustine cementnog kamena, odnosno efekti smanjenja njegove poroznosti [22].

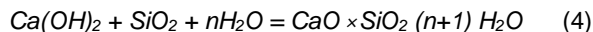


Slika 7. Mehanizam dejstva superplastifikatora i silikatne prašine [22]

Ultra fine čestice silikatne prašine utiču na svojstva svežeg i očvrslog betona putem svog sfernog oblika i veličine, koja je 10 - 100 puta manja od veličine čestica cementa, tako da se, osim velikih specifičnih površina, može govoriti i o tzv. "gustom pakovanju", odnosno pokoravanju čestica poznatim geometrijskim i kinema-

tičkim principima. Naime, cementna pasta kojoj je dodata silikatna prašina, i to najviše do 15% u odnosu na masu cementa, ima vrlo visok sadržaj čvrstih čestica u tečnom medijumu, tako da zrnca silikatne prašine vrlo efikasno popunjavaju prostore između inače gusto upakovanih čestica cementa (sl. 7), pri čemu sama pasta ima veoma visoku kohezivnost. Povećana potreba za vodom pri primeni silikatne prašine, uslovljena veoma velikim specifičnim površinama, kod spravljanja betona uspešno se kompenzira upotrebom dodataka betonu tipa superplastifikatora, tako da se zahvaljujući ukupnim efektima primene silikatne prašine i superplastifikatora, mogu dobiti betoni sa čvrstoćama pri pritisku između 80 i 150 MPa, a sa čvrstoćama pri savijanju od 6 do 12 MPa [22].

Pored fizičkog dejstva napred pomenutog "gustog pakovanja", ultra fine čestice SiO₂ u hidratisanom cementnom kamenu hemijski reaguju sa kalcijum-hidroksidom Ca(OH)₂, što znači da se obavlja i reakcija pucolanizacije - vezivanja SiO₂ i Ca(OH)₂ u produkte slične cementnom gelu. Na ovaj način povećava se količina produkata na kojima se zasniva čvrstoća cementnog kamena, a ujedno se smanjuje količina Ca(OH)₂, koji bi tokom korozije betona bio ispran i na taj način uticao na povećanje poroznosti cementnog kamena. Tako, na primer ako Ca(OH)₂ rastvoren u vodi (dobijen pri hidrataciji cementa) stupa u reakciju sa SiO₂, dobiće se hidrosilikat kalcijum:



Regulisanje strukture cementnog kamena u betonu može da ide i u pravcu programiranog povećanja njegove poroznosti. Na primer, za dobijanje betona (a to isto važi i za cementni kamen) otpornog na dejstvo mraza i na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, može se ići i na uvođenje u strukturu cementnog kamena dodatne poroznosti korišćenjem postupka aeriranja. Primenom hemijskih dodataka - aeranata u strukturi betona se formiraju mehurići vazduha veličine 0,01-0,3 mm koji su ravnomerno raspoređeni unutar mase cementnog kamena. Ovi mehurići prekidaju mrežu kapilara u cementnom kamenu, pa se na taj način, s jedne strane, smanjuje

kapilarno upijanje vode, a s druge strane, ukoliko dođe do smrzavanja vode unutar mase betona, dobija prostor za nesmetano širenje leda, tj. putem mehurića uvučenog vazduha u betonu stvara se rezervna zapremina pora koja je najčešće za oko 20% veća od zapremine zamrznute vode. Odlučujuću ulogu u povećanju otpornosti na dejstvo mraza aeriranih betona ima međusobna udaljenost vazdušnih mehurića (spacing factor, sl. 8) [13]. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da se najpovoljniji rezultati dobijaju pri razmacima vazdušnih mehurića 0,15-0,25 mm, što uslovljava da se optimalna količina uvučenog vazduha mora posmatrati u funkciji količine cementne paste, odnosno u funkciji krupnoće agregata. Kako optimalan procenat vazdušnih mehurića, u ovakvim slučajevima, obično iznosi 4-6% u odnosu na ukupnu zapreminu betona, povećanje otpornosti betona na dejstvo mraza ne podrazumeva istovremeno i smanjivanje njegove čvrstoće. Razlozi za ovo, u prvom redu, leže u činjenici da mehurići vazduha u svežem betonu igraju i ulogu plastifikatora, pa se time smanjuje potreba za vodom i nadoknađuje eventualni gubitak čvrstoće prouzrokovan povećanom poroznošću.

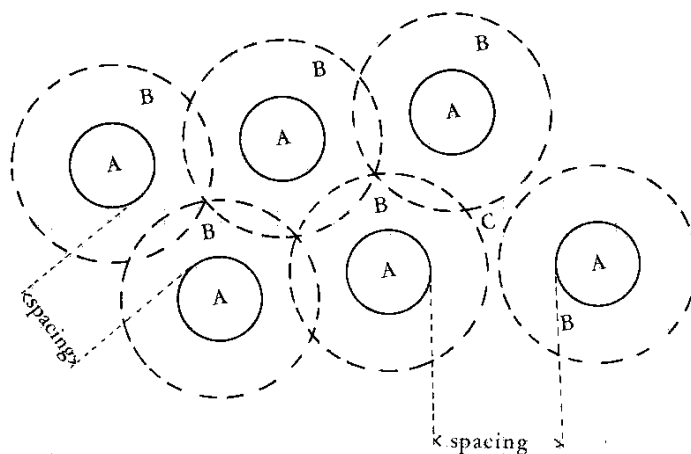
Smanjenje kapilarne poroznosti betona može se postići, kao što je već rečeno pod tačkom 3, upotrebom hemijskih dodataka tipa plastifikatora ili superplastifika-

tora, čiji mehanizam dejstva je prikazan na slici 9. Ovi hemijski dodaci desete generacije omogućavaju procesat smanjenja sadržaja vode u betonu i do 30%, a isto tako i očuvanje "slump"-a u toku zahtevanog vremena (i do 2 časa) [10].

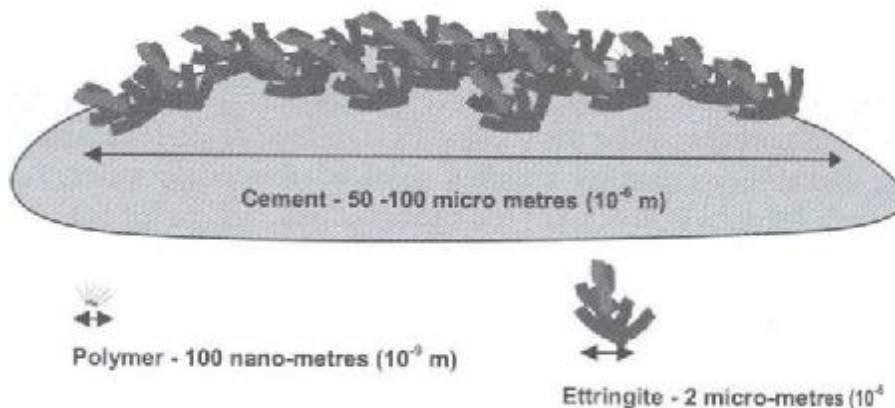
Raspored pora u strukturi betona i modeliranje pornog prostora može se postići i upotrebom npr. metakaolina kao jednog dela veziva.

Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) je amorfni proizvod dehidratacije kaolinita koji se odlikuje visokom pucolanskom aktivnošću. Uticaj metakaolina na mikrostrukturu i difuziona svojstva cementnih pasti i maltera je predmet interesovanja mnogih naučnika. Pokazalo se da se značajno smanjenje srednje veličine pora postiže kada se na primer 20% cementa zameni metakaolinom. Isto tako, dodatkom metakaolina smanjuje se brzina difuzije Cl^- i Na^+ jona i brzina apsorpcije vode u malterima. Isto tako pokazano je da prisustvo metakaolina u određenom procentu može potpuno da spreči veoma štetnu alkalno-silikatnu reakciju i formiranje bubrečeg gela [23].

Rezultati naših ispitivanja pokazuju da se upijanje vode može smanjiti i za cca 26% uz porast čvrstoće pri pritisku za cca 17% u prisustvu metakaolina [19], [20].



Slika 8. Faktor razmaka ("spacing") kod aeranata [13]



Slika 9. Mehanizam dejstva superplastifikatora [10]

Tabela 6. Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona [9]

	Klase izloženosti																
	Bez rizika korozije ili agresije	Korozija prouzrokovana karbonatizacijom					Korozija prouzrokovana hloridima					Uticaj zamrzavanja/odmrzavanja					
		Morska voda					Hloridi koji ne potiču iz morske vode					Hemijski sredina					
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Max v/c	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.55	0.55	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45
Min. klasa čvrstoće	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Min. količina cementa (kg/m ³)	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Min. sadržaj vazduha (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^b	-	-	-
Drugi zahtevi	Agregat u skladu sa prEN 12620:2000 dovoljne otpornosti na zamrzavanje/odmrzavanje																

Za beton bez uvučenog vazduha, svojstva betona treba da budu ispitivana prema odgovarajućem postupku ispitivanja, u poređenju sa betonom za koji je dokazana otpornost na zamrzavanje/odmrzavanje za relevantnu klasu izloženosti.
Kada SO₄²⁻ vodi ka klasama izloženosti XA2 i XA3, osnovno je upotrebiti sulfatno otporni cement. Kada je cement klasifikovan prema sulfatnoj otpornosti, treba koristiti cement umerene ili visoke otpornosti na sulfate u klasi izloženosti XA2 (i u klasi izloženosti XA1 kada je primenljivo), cement visoke otpornosti na sulfate treba da bude korišćen u klasi izloženosti XA3.
Sulfatno cement^o otporni

6 ZAKLJUČAK

Na osnovu svega prethodno rečenog može se zaključiti da se otpornost betona i betonskih konstrukcija prema koroziji može povećati delovanjem u pravcu izrade betona što je moguće manje poroznosti, a to znači upotrebom dovoljno niskih količina vode pri spravljanju betona. Visoka homogenost betona, vrlo visok nivo mehaničkih čvrstoća kao i visok stepen vodonepropustljivosti mogu se postići samo pravilnim izborom agregata i granulometrijske kompozicije, izborom vrste i optimalne količine cementa, povećanjem stepena hidratacije, efikasnim ugrađivanjem, kao i primenom različitih hemijskih dodataka betonu putem kojih se deluje na mikrostrukturu betona. U svetlu svega ovoga napred iznetog, prema evropskom standardu navedenom u okviru tabele 6 [9], daju se preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona, tj. za određene stepene izloženosti korozionoj sredini i zahtevanu klasu - marku betona, minimalne količine cementa i maksimalan vodocementni faktor.

Hemijski dodaci betonu tipa plastifikatora ili superplastifikatora, eventualno dodaci tipa zaptivača i dodaci sa simultanim efektom aeriranja i plastificiranja direktno će uticati na modeliranje pornog prostora i raspored pora u strukturi betona. Svakako, pri ovome treba voditi računa o kompatibilnosti hemijskih dodataka sa upotrebljenim cementom, kao i o eventualno štetnim materijama tipa hlorida, prisutnim u hemijskim dodacima [12].

Primenom mineralnih dodataka tipa zgre, pucolana, silikatne prašine ili metakaolina, u tačno određenom procentu može se takođe uticati na mikrostrukturu betona kao kompozita, ali isto tako i na poboljšanje korozione otpornosti. Navedeni dodaci utiču i na kvalitet prelazne - tranzitne zone između zrna agregata i cementnog kamena pa time i na poboljšanje vodonepropustljivosti i trajnosti betona.

Ukoliko se na osnovu prethodno sprovedenih analiza pokaže da se radi o izrazitoj agresivnosti sredine (na osnovu datih klasa izloženosti) tako da se zahtevana trajnost konstrukcije ne može obezbediti unutrašnjom otpornošću pristupa se i izradi projekta antikorozivne zaštite betonske konstrukcije na bazi različitih premaza, vodonepropustljivih materijala i obloga, što nije predmet ovog rada.

Treba napomenuti da je veoma važno napraviti program osmatranja i održavanja objekata od betona pa s tim u vezi proveriti alkalnost betona, dubinu karbonatizacije kao i propagaciju prslina.

7 LITERATURA

- [1] D. Jevtić: Svojstva svežeg i očvrslog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine, monografija, 1996. Beograd, Građevinski fakultet Beograd.
- [2] N. Bilbija: Tehnička petrografija - svojstva i primena kamena, Naučna knjiga, Beograd, 1984, str. 2.
- [3] SRPS ENV 197-1 Cement, sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti. Deo 1: Obični cement, 2000.
- [4] D. Jevtić: Hemijski agresivne sredine i stepeni agresivnosti, "Korozija, trajnost i zaštita betonskih konstrukcija", seminar SDGKJ, Beograd 1988.
- [5] M. Muravljev: Osnovni aspekti trajnosti betona i betonskih konstrukcija, Korozija, trajnost i zaštita betonskih konstrukcija", seminar SDGKJ, Beograd 1988.
- [6] M. Muravljev, V. Ukrainčik, D. Bjegović, D. Jevtić, N. Denić: Korozija i zaštita materijala, Građevinski kalendar, 1989, DGIJ Beograd, str. 11.
- [7] M. Muravljev: Osnovi teorije i tehnologije betona, Građevinska knjiga, Beograd, 1991, str. 184.
- [8] S. Mladenović, M. Petrović, G. Rikovski: Korozija i zaštita materijala - Hemijsko-tehnološki priručnik 6, Beograd, 1985.
- [9] Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1:2000, Beton-Deo 1: Specifikacija, svojstva, proizvodnja i kontrola saglasnosti, naučnostručni skup - JUDIMK, Beograd, 2004.
- [10] Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R.: Tailored Properties of Concrete to Keep it Attractive, *fib* Symposium "Keep Concrete Attractive", Budapest 2005.
- [11] Jevtić, D.: Osnovni principi zaštite betonskih konstrukcija, VIII YUCORR R Korozija i zaštita materijala u industriji u građevinarstvu, Tara 09-12.05.2006., plenarno predavanje ISBN 86-82343-07-X., Zbornik radova, str. 79-90.
- [12] Jevtić, D.: Dodaci betonu, Zbornik radova naučnostručnog skupa JUDIMK-a "Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1: 2000", 14.10.2004., Beograd, Zbornik radova, str. 113-128.,
- [13] Collepardi, M.: Scienza e tecnologia del calcestruzzo, Hoepli, Milano, 1980.
- [14] Mehta, P.K. and Aitcin, P.C., Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete, SP 121, High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI, 1990.
- [15] Monosi, S. and Collepardi, M., Low Porosity and Early Durability of Concrete, RILEM, From Material Science to Construction Materials Engineering, Vol. I, Versailles, September 1987.
- [16] Mor, A., Mehta, P.K., Effect of Superplasticizing Admixtures on Cement Hydration, Cement and Concrete Research, Vol. 14, 1984.
- [17] Roy, D.M. and Idorn, G.M., Hydration, Structure and Properties of Blast-Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete, ACI Journal, Vol. 79, No. 6, Nov-Dec 1982.
- [18] Swamy, R.N., The Nature of the Strength of Concrete, Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa 1980.
- [19] Jevtić, D.: Modeliranje svojstava kompozita tipa maltera savremenim dodacima, Građevinski kalendar 2008, str. 42.
- [20] Jevtić, D. Pavlović, Lj., Terzić, A., Dimitrijević, V.: Poboljšanje otpornosti na mraz cementnih kompozita u prisustvu metakaolina, XX Simpozijum o koroziji i zaštiti materijala sa međunarodnim učešćem, Podgorica. 2006, str. 102-107.
- [21] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: Istraživanja na području materijala i njihove primene. Generalni izveštaj i prikaz radova za XXIII Kongres Društva za ispitivanje materijala i konstrukcija SCG. Materijali i konstrukcije br. 4, god. 2005, str. 9-15.
- [22] Muravljev, M., Jevtić, D.: Građevinski materijali 2, Akademski misao, 2003, Beograd, str. 22.
- [23] Khatib J.M. and Wild S.: Pore size distribution of metakaolin paste. Cem. Concr. Res. 26 (1996), pp. 1545-1553.

REZIME

MOGUĆNOST MODELIRANJA SVOJSTAVA BETONA U FUNKCIJI POVEĆANJA TRAJNOSTI

Dragica JEVTIĆ

U radu se prikazuju parametri koji utiču na koroziona svojstva agregata, cementa, cementnog kamena i betona kao kompozitnog materijala. Posebna pažnja je posvećena makro i mikrostrukтури očvrstlog betona kao i načinima kojima je moguće promeniti - smanjiti kapilarnu poroznost betona. U tom smislu daju se primeri primene superplastifikatora, aeranata, silikatne prašine kao i metakaolina. Kriterijumi trajnosti betona s obzirom na agresivnost sredine dati su prema novom evropskom standardu EN 206-1:2000. Dalje prikazuju se preporučene vrednosti sastava betona zavisno od klase izloženosti.

Ključne reči: beton, trajnost korozija, evropski standard EN 206-1

SUMMARY

MODELING POSSIBILITY OF CONCRETE PROPERTIES IN ORDER TO INCREASE ITS DURABILITY

Dragica JEVTIĆ

The parameters that have influence on corrosion properties of aggregate, cement, hardened cement paste and concrete as a composite material, are presented in the paper. Special attention has been paid to the macro and micro structure of the hardened concrete, as well as to the possible ways for reduction of the capillary porosity of concrete. In relation to that, the examples of application of superplasticizers, air-entraining agents, silica fume and metakaolin are presented. The criteria of durability of concrete in relation to the aggressiveness of the environment are given according to the new European standard EN 206-1:2000. Furthermore recommended values of concrete composition related to the classes of exposition are shown.

Key words: concrete, durability corrosion, European standard EN 206-1

O PRIMENI JEDNOG MODELA PODATAKA NA ISPITIVANJE MOSTOVA BEZ RAZARANJA

Miodrag KIRIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.21.03.001.573:620.179.1 = 861

1 UVOD

Za rešavanje hipoteke od 187.000 neispravnih mostova i 5.000 mostova koji se pokvare godišnje, i da bi se osiguralo da se sredstva za izgradnju ili rehabilitaciju mostova utroše na optimalan način, Federalna administracija za autoputeve SAD (FHWA) je pre 10 godina obavezala uvođenje sistema upravljanja mostovima [1]. Primena ovih sistema zasnovana je na korišćenju računara i savremene baze podataka. Uvođenjem jezika EXPRESS za opis podataka, primena kompjuterski podržanih sistema za projektovanje (CAD) je oslobođena zavisnosti od vlasništva nad računarskim sistemima i formatima i CAD podaci koji opisuju gotove proizvode postali su razmenjivi između ovih sistema u toku projektovanja i procesa proizvodnje u realnom vremenu.

U ovom radu su razmotreni podaci koje daju IBR metode za mostove. Predložen je model identifikacije senzora korišćenih za kontrolu i upravljanje mostom, pri čemu je primenjen pristup objektno-orijentisanog programiranja (OOP) i s tim u vezi razmotrene su odgovarajuće definicije i relacije iz objektno-orijentisane baze podataka IFC.

2 ISPITIVANJA MOSTOVA PRIMENOM

Dinamičko ispitivanje mostova daje informacije o njihovom ponašanju i svojstvima u radnim uslovima, koje mogu da se koriste za ocenu integriteta. Polazeći od merenog dinamičkog odziva na nekontrolisanu ili prinudnu pobudu, mogu da se odrede parametri vibracija (frekvencije sopstvenih oscilacija, oblici vibracija i vrednosti njihovog prigušenja) i parametri sistema (krutost, masa i matrice prigušenja).

Razlog za dinamičko ispitivanje mostova je u tome što ono omogućuje praćenje ukupnog stanja konstrukcije standardnim merenjem njenog dinamičkog odziva. Veličina oštećenja mosta ili njego-vog pogoršanja određuje veličinu promene posmatranog parametra sistema, koju je moguće meriti standardnim tehnikama dinamičkog ispitivanja. Drugi razlog je očekivano preopterećenje od jačeg dejstva okruženja, prenamene, ili posle nastupanja preopterećenja np. pri vojnim manevrima na mostu [2]. Razlog može da bude i ocena dinamičkog ponašanja sličnih konstrukcija. Na taj način formirana baza podataka može da se koristi za predviđanje ovakvog odziva novih konstrukcija i tako uštede sredstva, pošto ispitivanja realne konstrukcije mogu da budu skupa.

Tri vrste ovih ispitivanja se primenjuju: ispitivanja sa statičkim opterećenjem (SL), metode dinamičkih ispitivanja bez kontrole ulaza (NC) i ispitivanja sa kontrolom ulaza (FV), od kojih su dve poslednje sa prinudno izazvanim vibracijama.

SL ispitivanja mostova se normalno primenjuju u svetu za praćenje deformacija novoizgrađenih mostova kao i mostova koji se koriste u uslovima ekstremnih opterećenja. Rezultati ovih ispitivanja se upoređuju sa odgovarajućim projektnim vrednostima. Deformacije mostova se mogu meriti pomoću mehaničkih merača deformacija (deflektometara) učvršćenih na izabranim mestima konstrukcije kao na njenoj donjoj strani kojoj se lako pristupa, što nije moguće ako most prelazi preko vode ili je visoko iznad tla. Utvrđeno je da ovaj metod merenja skretanja ima nedostatke navedene u [3].

NC ispitivanje se sastoji od merenja vibracionog odziva konstrukcije pod radnim opterećenjem. Opterećenje može da bude usled saobraćaja, vetra i talasa. Pošto pobuda nije poznata, uvode se određene pretpostavke. U većini slučajeva, njena priroda se jedino može aproksimirati statističkim opisom (np. opterećenje od vetra) ili usvajanjem da je spektar pobude koncentrisan u nekom frekventnom području (np. od 2 – 4 Hz za pobuđivanje mostova automobilskim saobraćajem). Ponašanje mosta pri takvom opterećenju se određuje pomoću GPS ili drugih mernih tehnika [4,5].

Adresa autora:
Dr Miodrag Kirić, dipl.inž.
Inovacioni centar Mašinskog fakulteta
Beograd, Kraljice Marije 16

Ocene vrednosti prigušenja vibracija mogu da sadrže greške zbog kombinovanog uticaja faktora kao što su (moguća) nestacionarnost procesa pobuđivanja, obrada signala i procedure analize signala, potrebnih za određivanje parametara nastalih modova ili nedovoljne pobude određenih modova. Pošto prigušenje zavisi od amplitude vibracija, opravdano je pretpostaviti da se rezultati dobijeni pri niskom nivou pobude ne mogu primeniti na predviđanje dinamičkog odziva na pobudu sa velikom amplitudom. Jedan od razloga je nelinearnost koju pokazuju mnoge realne konstrukcije pri dovoljno velikoj amplitudi pobude. Otuda izgleda da su veće amplitude pogodnije za ocenu integriteta mosta nego pobuđivanje niskog nivoa.

Eksperimenti tipa FV su kontrolisani pošto se izvode sa poznatim vrednostima sile i frekvencijama. Prednost ove vrste ispitivanja je u tome što je šum odziva konstrukcije potisnut. Pobudni uređaj može da bude vibrator sa ekscentričnom rotira-jućom masom, čija frekvencija može da se menja promenom brzine okretanja osovine, elektrohidraulički vibrator koji može da proizvede veće sile od ostalih vibratora i udarači, koji saopštavaju željeni impuls konstrukciji promenom mase udarne naprave (čekić ili obešena masa). FV zahteva primenu softvera za analizu odziva mosta i određivanje parametara vibracija i sistema.

Tačna ocena deformacije i oštećenja koje je konstrukcija pretpela usled opterećenja, korozije itd., i naročito pri katastrofalnim događajima (npr. zemljotresu, eksploziji ili terorističkom napadu) je kritična za određivanje njene sigurnosti. U tom cilju se predlaže tehnologija nazvana nadograđena stvarnost (NS), kojom se podatak o konstrukciji poziva iz memorije, superponira se na sliku stvarne konstrukcije i zatim ocenjuje njeno oštećenje i integritet običnim merenjem i interpretiranjem ključnih razlika između ranijeg i novog stanja [6]. Za razliku od ugrađenih senzora, NS sistem (NSS) se koristi u okruženju koje nije unapred pripremljeno.

Jedan od načina da se dobije ovo upoređenje je postavljanje senzora za praćenje na telo korisnika koji se kreće po objektu, sa primenom magnetske, ultrazvučne ili optičke tehnologije, ali je ovo skopčano sa

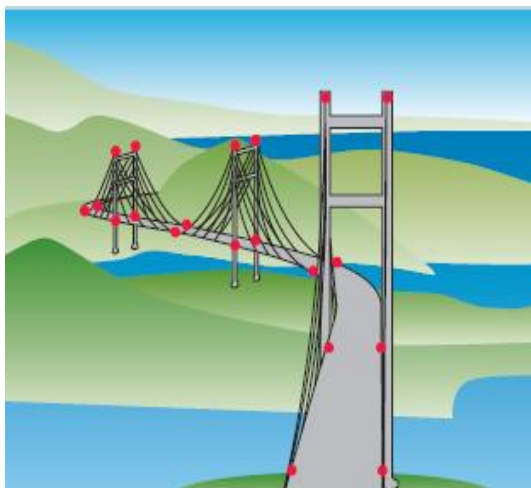
postavljanjem i korišćenjem velike instrumentacije ili gustog rasporeda davača i senzora. Sistemi za praćenje mogu takođe da se baziraju na računarskoj slici kretanja kamere koju nosi korisnik NSS [4].

3 PRIMENA GPS

Korišćenje globalnog sistema za pozicioniranje (GPS) ima određene prednosti i stoga će biti detaljnije izloženo.

Generalno, ispravnost i praćenje konstrukcija kao što su mostovi, brane, tuneli, nadvožnjaci, potporni zidovi, rudnici, železničke pruge i visoke građevine, je od vitalnog značaja za ekonomiju i svakodnevni život. Savremeni mostovi na kablovima predstavljaju dinamičke konstrukcije koje nose veliko opterećenje često na velikoj dužini, a izloženi su udarima vetra, morskih talasa, opterećenjima od saobraćaja, zagrevanju i hlađenju, koroziji i drugim uticajima okoline. Za kontrolu i praćenje mostova, kao i za njihovu izgradnju, koriste se GPS prijemnici i odgovarajući softveri, koje odlikuju visoka tačnost i brzina merenja položaja izabranih tačaka, slika 1, nezavisnost od vremenskih uslova i njihove uzajamne vidljivosti. Za neprekidno praćenje deformacija usled opterećenja nosećih elemenata mosta se koriste np. tzv. totalne stanice, slika 2.

Osim ovih prijemnika, u skorije vreme se koriste i globalni navigacioni satelitski sistemi (GNSS) sa kretanjem prijemnika u realnom vremenu (RTK), koji se odlikuju visokom rezolucijom i raspoložu mogućnošću prijema GPS i GLONASS signala. GLONASS RTK prijemnici omogućuju određene korekcije kojima se postiže veća preciznost u pozicioniranju i zamenjuju postojeće GPS antene i prijemnike. Funkciju praćenja omogućuje softver sa otvorenim arhitekturom, koji u opštem slučaju ima dve namene: praćenje (monitoring) kontrolom senzora i prikupljanjem podataka u realnom vremenu, a druga je analiza, vizualizacija i naknadna obrada podataka. Softver omogućava uzimanje podataka od više senzora i njihovu obradu, kao i obaveštavanje



Slika 1. Ilustracija kritičnih tačaka mosta čiji se položaji povremeno mere



Slika 2. Neprekidno merenje deformacije elementa mosta [7]

korisnika putem e-mejl ili SMS poruka, ili spoljnim uređajima. Novija tehnologija – 3D lasersko skeniranje, omogućuje visoku rezoluciju i brzinu skeniranja od 50.000 tačaka u sekundi. Oblast primene ovih skenera su auto putevi i mostovi, gradske saobraćajnice, železnička infrastruktura, unutrašnjost i spoljašnjost zgrada i objekata, pojedinačni rezervoari, elektrane i fabrike, iskopi i otvoreni kopovi i dr. Ovome treba dodati doprinos CAD projektovanju koje je brže i može za jedan objekat da dá više varijanti. Snimljen oblak tačaka se obrađuje odgovarajućim softverom koji daje digitalan model željenog preseka (profila), površine, zapremine, rastojanja između tačaka i omogućava proveru i upoređenje različitih varijanti projekta, kao i upoređenje zateženog stanja konstrukcije (mosta) sa njegovim prethodnim (polaznim) stanjem.

Da bi pristup NSS dao očekivane rezultate, potrebna je velika količina podataka. To znači da je potrebno znati spoljašnju geometriju objekta pre oštećenja, koja služi kao osnovna slika pri izračunavanju IDR. Kao podesan format za podatke, koji osim geometrije konstrukcije treba da uključe i fizička svojstva korišćenih materijala, mogu da se koriste modeli za razmenu proizvoda izgradnje, kao što su format za razmenu podataka o konstrukcionim čelicima CIS/2) i Osnovne industrijske klase (IFC). Kao CIS/2, IFC omogućava prenos kompletnog, tačnog modela proizvoda od jedne aplikacije do druge bez gubitka informacija.

4 METODE IBR KOJE SE PRIMENJUJU

Izbor metoda IBR i procene bez razaranja (NDE) treba da uzme u obzir vrstu mosta i korišćene materijale. Podaci su obično zasnovani na vizuelnom pregledu mosta. Potrebni su kvantitativni podaci NDE i IBR o stanju mosta, i njihov bežični prenos do IFC servera. Ovo je značajno za neka skrivena oštećenja, kao što je korozija čeličnog ojačanja u betonu ili kumulativne zamorne prsline u čeličnim mostovima. Izdvojene su sledeće metode.

– Infracrvena termografija, pouzdanija od klasične, za kvantitativno ispitivanje ploče betonskog mosta - detekciju razdvajanja u golom betonu i u betonu presvučenom asfaltom.

– Radarski sistem za ispitivanje ploče mosta, koji koristi impulsni radar, sličan radarskom sistemu za ispitivanje zemljišta, sa naprednom obradom signala i slike, koja omogućava dobijanje slike unutrašnjosti ploče od ojačanog betona sa šupljinama i ojačanjem, [8,11].

– Globalno merenje mosta pomoću prenosivog laserskog sistema koji brzo meri deformaciju mosta sa tačnošću do 1 mm. Laserski sistem koji koristi Doplerov efekat meri i analizira vibracije mosta (merenje frekvencije i amplitude) u cilju određivanja značajnih konstrukcionih osobina mosta i otkrivanja oštećenja.

– Merenje akustičke emisije od prsline koje potiču od zamora u uslovima saobraćaja preko mosta.

– Detekcija prsline od zamora zasnovana na kombinovanju mogućnosti ultrazvučnog i magnetnog ispitivanja u čeličnim mostovima preko zaštitnog premaza.

– Merenje preopterećenja od velikih kamiona i zemljotresa pomoću posebnih senzora od čelika.

– Neprekidno merenje najveće deformacije velikih čeličnih mostova pomoću čeličnih senzora na osnovu promene magnetskih osobina čelika.

– Termografska detekcija i kvantitativno određivanje prsline od zamora u čeličnim mostovima zasnovana na korišćenju komercijalnog termografskog uređaja velike rezolucije kojim se otkrivaju površinske prsline od zamora.

– Ultrazvučno otkrivanje šupljina u prednapregnutom betonu ili prsline i korozije u čeličnim mostovima impulsnom eho tehnikom sa primenom C-prikaza, i ocena greške tehnikom difrakcije ultrazvučnog ispitivanja (UT) sa C-prikazom i P-prikazom [9], ima i odlike globalnog metoda, umesto lokalnog sa A-prikazom.

– Merenje sila u kablovima pomoću laserskog vibrometra.

– Merenje deformacije pomoću optičkog kabla sa primenom interferometrijskog metoda i Bragove rešetke.

– Ispitivanje kablova mosta manjeg prečnika metodom rasutog magnetskog fluksa.

Identifikacija radio talasima (RFID) je predložena tehnologija auto – identifikacije za istovremeno identifikovanje "objekata" na udaljenosti [10]. Identifikator ID može da se zada informatičkim modelovanjem zgrade (BIM). Lokacije RFID "privezaka" mogu da se vide u 3D modelu. Na ovaj način mogu da se identifikuju elementi mosta i senzori za NDE i IBR, koji se za neprekidan rad mogu napajati iz fotonaponskih ćelija.

Karakteristike prsline (veličina i dubina) mogu da se menjaju sa vremenom (ponašanje objekta). Promenu ponašanja komponente izaziva promenljivo opterećenje i ona može da se realizuje deformacijom njenog oblika ili vibriranjem. 3D model konstrukcije u toku i posle izgradnje postaje 4D model.

Povremena razmena informacija kao snimak, bila je prvobitna namena programskog jezika STEP, koji je još u upotrebi, ali su potrebna nova poboljšanja njegove strukture [11].

5 DIGITALNI ULTRAZVUČNI UREĐAJI I SENZORI

Digitalni ispitni uređaji imaju sličnosti u pogledu funkcija koje omogućuju njihova podešavanja.

Parametri koji određuju podešenost ultrazvučnih ispitnih uređaja (IU), mogu da se pozovu iz memorije (koja se obično označava kao data logger). Rezultat je da se zatečena podešenost IU zamenjuje pozvanom. Na taj način ponavljanje kalibracije IU nije potrebno.

IU su organizovani tako da su njihove funkcije u cilju preglednosti podeljene u dva ili tri nivoa. U prvom nivou su obično grupe međusobno nezavisnih funkcija, što je detaljnije dato u [11,12].

Pri eksportovanju podataka moguće je pretvaranje grafičkih elemenata (obrasci, A-prikazi ili skice koje se dobijaju uz softver) u sledeće poznate formate fajlova: BMP, CGM, DRW, DXF, GIF, PCX, TGA, TIF, WMF i WPG. Izveštaji u obliku teksta, sačuvani u formatu WMF, mogu da se importuju u grafičke programe (npr. CorelDraw).

Pomoću posebnih softvera, koji imaju za osnovu C programski jezik, omogućeno je:

- Upravljanje (podešavanje) na daljinu IU
- Zapisivanje podešenosti u izveštaju u

- Prikazivanje sadržaja ekrana IU u PCX ili IMG formatu.

- Pozivanje vrednosti ili stanja funkcije
- Unošenje nove vrednosti ili stanja funkcije.

Senzori, kao i komponente mosta, predstavljaju objekte sa aspekta OOP. Klasa senzor sastoji se od karakteristika i metoda koje imaju svi senzori, kao što je namena (kontrola mosta na nerazarajući način) i recimo, sposobnost da pretvore analogan signal u električan izlaz. Potklase klase senzor, različite vrste senzora imaju specifična „ponašanja“. Tako senzori za merenje vibracija, poznati kao akcelerometri, imaju nasleđenu namenu i mogućnost, ali menjaju nasleđeni metod uvodeći njihov specijalizovan metod merenja. Na taj način je svaki objekat u mogućnosti da prima poruke (naredbe za promenu opsega ili pojačanja, za početak ili kraj merenja), da uzima i obrađuje podatke (pretvaranje analognih u digitalne signale). Međusobno delovanje ovih objekata se ne razmatra, za razliku od komponenta mosta, jer različite komponente koje obrazuju klasu (most) mogu da utiču jedna na drugu pomeranjima i silama, zavisno od njihovog mesta u konstrukciji mosta.

ID, pridružen svakoj komponenti mosta u fazi projektovanja, definiše se u 3D modelu i zapisuje se u bazi podataka. ID-ovi senzora zakačenih za jednu komponentu mogu da se definišu pomoću ID date komponente. Na sličan način se može definisati ID za ispitivanje prenosnom ispitnom opremom (ovo može da se obavi pri kontrolnom, redovnom ili glavnom pregledu ili kada to izgleda potrebno). Senzorima osim ID komponente mosta, se daju dodatne oznake. Tako za komponentu 24 visećeg mosta SB (oznaka mosta), senzorima S1, S2,... se mogu dodeliti ovi ID kodovi:

- SB24O1VC, SB24O2VC, za vizuelnu kontrolu
- SB24S1AE, SB24S2AE, za akustičku emisiju
- SB24S1AC, SB24S2AC, za akcelerometre
- SB24S1UT, SB24S2UT, za UT ispitivanje
- SB24S1CO, SB24S2CO, za detekciju korozije
- SB24O1RA, SB24O2RA, za ispitivanje ploče radarom itd.

6 OSNOVNE ODLIKE IFC I BIM

Osnovne industrijske klase (IFC) su elementi podataka koji predstavljaju delove zgrade, ili elemente procesa i sadrže relevantnu informaciju o njima. IFC

koriste računarske aplikacije za obrazovanje za računar razumljivog modela konstrukcije, koji sadrži sve podatke o delovima i njihove relacije koje treba da budu dostupne učesnicima projekta. Model projekta sačinjava objektno orijentisanu bazu podataka sa informacijama koje dele učesnici projekta i nastavlja da raste kako projekt prolazi kroz projektovanje, izgradnju i korišćenje kao 4D model.

Prema izveštaju Američkog Instituta NIST, namenjenog vlasnicima i rukovaocima kapitalnih objekata, kao konzervativna ocena, zaključeno je da se godišnje izgubi 15,8 milijardi dolara u velikim američkim industrijskim postrojenjima zbog „jako fragmentirane prirode ove industrije, nastavljanja poslovne industrijske prakse zasnovane na papirima, nedovoljne primene standarda i neodgovarajuće primene tehnologije od strane izvođača“ [13]. U skladu s tim u Danskoj je IFC uveden kao obavezan standard za javne objekte.

T.uslovi IFC ima za cilj da podrži učesnike iz različitih disciplina u toku realizacije projekta, kao što su arhitekta, izrada servisnih funkcija zgrade (KGH-klimatizacija, grejanje, hlađenje, električnom energijom), automatizacija građenja, analiza konstrukcije i inženjerskih radova, ušteda materijala i procena troškova, planiranje izgradnje i rokova, predaja objekta i upravljanje. Ovo su klase na vrhu hijerarhije IFC modela podataka. Sledeći sloj (nivo) je sloj interoperabilnosti u kome su sve klase koje služe za povezivanje i saradnju. Ispod njega je jezgro u kome su klase kontrole, proizvoda i procesa, što je delimično prikazano u Tabeli 1.

IFC su model podataka koji predstavlja neutralnu i otvorenu specifikaciju koju ne kontrolišu jedan ili grupa prodavaca. To je format fajla objektno orijentisan sa modelom podataka koji je razvio Međunarodni savez za međusobnu razmenu (IAI) da bi pospešio međusobnu razmenu u građevinskoj industriji i opšte je prihvaćen format za BIM, [14]. On omogućuje prenos informacija bez gubitaka između različitih korisničkih aplikacija.

Razvoj IFC je bio postepen i zasnovan na jeziku XML. IFC2x3 platforma specifikacije predstavlja najnovije izdanje IFC specifikacije [15]. IFC2x3 podržava koordinaciju disciplina projektovanja, predaju objekta na upravljanje, kao i upravljanje objektom.

Uvođenje IFC specifikacije se zasniva na obaveznoj šemi EXPRESS (ISO10303-11:1994), [16]. Za upravljanje mostom u toku celog njegovog veka koristi se IFC standard ISO/PAS 16739:2005 [17].

Tabela 1. Hijerarhija IFC modela podataka

Nivo (sloj) domena	Kontrola izgradnje	Protivpožarna zaštita	Upravljanje izgradnjom	
	Grejanje, klimatizacija	Električne instalacije	Arhitektura	
Nivo (sloj) interoperabilnosti	Zajednički elementi upravljanja		Zajednički elementi instalacija	
	Zajednički elementi funkcija zgrade	Zajednički elementi zgrade	Zajednički elementi komponenata	
Jezgro	Opseg kontrole	Opseg proizvoda	Opseg procesa	
	Platforma IFC2x2 (ISO/PAS 16739)	Jezgro	IFC2x3 (poslednja verzija)	
	Deo koji ne pripada IFC2x2			
Nivo (sloj) podataka	Podaci o materijalima	Podaci o rokovima	Podaci o cenama	
	Podaci o odobrenjima	Količine	Topologija	Podaci o opterećenjima
	Time series resource	Materijal	Mere	Prezentacije

BIM označava informatičko modelovanje zgrade, ali može da označava i informatički model zgrade. Informatički model predstavlja skup informacija u digitalnom formatu, formiran i održavan u toku celog životnog veka zgrade, računajući od početka projekta, dok je informatičko modelovanje proces formiranja i upravljanja informatičkim modelom zgrade. BIM prikazuje geometriju, prostorne rasporede, geografski položaj, količine i osobine građevinskih komponenti i pojedinosti o izgradnji.

BIM predstavlja unapređenje u oblasti grafičkog dizajniranja pomoću računara koje se do sada baziralo na metodi definisanja linija pomoću vektorskih fajlova koji se kombinuju za prikazivanje objekata, jer on omogućuje bolju vizuelizaciju i uvid u celokupan tok realizacije projekta, što je ilustrovano na slici 3. Poznati softveri za BIM su: Autodesk Revit, ArchiCAD, Vector-Works, Constructor i Data Design System.

Američki Institut Arhitekata je definisao BIM i kao "tehnologiju zasnovanu na modelu povezanom sa bazom podataka za informacije o projektu" [18].

7 ELEMENTI IFCXML2X3

U novom izdanju se koriste ista pravila i konfiguracije kao u izdanju ifcXML2x2 i šema EXPRESS. Sadašnji dokument nazvan IFC2x3 Konačna Dokumentacija kao

entitete sadrži klase označene: *IfcObject* i *IfcBuilding* i neke klase elemenata zgrade kao što su: *IfcElement-Zgrade*, *IfcGreda*, *IfcVertikalniElement*, *IfcElement*, [19].

Definicije klase su: *IfcObject* je generalizacija svake semantički razmatrane stvari ili procesa. Objekti su stvari onako kako one izgledaju, kao zid, greda ili prostor; *IfcBuilding* je konstrukcija koja pruža zaklon svojim stanarima ili sadržajima i stoji na jednom mestu. Klasa *IfcElement* je definisana kao generalizacija svih komponenta koje čine AEC proizvod. AEC proizvod je poznata skraćenica za proizvod arhitektonske, elektrotehničke i građevinske (AEC) industrije.

Svaki objekt u IFC koji ima geometrijsku reprezentaciju ima dva atributa: *PostavljanjeObjekta* i *Reprezentaciju*. Reprezentacija ima dva cilja: da pruži jasnu informaciju o obliku proizvoda i da pruži dodatne napomene o predstavljanju oblika proizvoda. Projekt *Ifc-Most* iz 2004. godine je imao za cilj da proširi ISO/PAS 16739 definisanjem standardnog pristupa upravljanju životnim ciklusom mosta. Tada su uvedeni novi entiteti: *IfcTipStruktureMosta*, *IfcTipTehnološkogElementaMosta*, *IfcPrizmatičniElementMosta*, *IfcTipVeznogElementaMosta*.

Konačna dokumentacija IFC2x3 definiše domen kontrola zgrade koji obuhvata sledećih 5 entiteta: *IfcTipPokretača*, *IfcTipAlarma*, *IfcTipKontrolera*, *IfcTipInstrumentaZaProtok* i *IfcTipSenzora*, koji je od interesa za ovaj rad.



Slika 3. Ilustracija za BIM: prikazani su izgradnja zgrade i njen završni izgled [13]

Potrebno je navesti da konačna dokumentacija za IFC2x3 iako sadrži 653 entiteta, ne uključuje klase *IfcBridge*, *IfcKolovoznaPloča*, *IfcKabl* i neke druge komponente mosta.

Grafički elementi (ehogrami) koje daju digitalni IU mogu da se unesu u datoteku u word ili XML formatu, kao i uskladišteni podaci dobijeni merenjem. Svi prikazi na ekranu IU (kao A, B ili C-prikaz) dobijaju se pomoću uređenih skupova izmerenih bročanih podataka, koji daju vreme preleta (položaj greške u odnosu na ispitnu glavu), amplitudu impulsa i koordinate ispitne glave (senzora).

Da bi se grafički elementi dobili korišćenjem ovih podataka u IFC bazi podataka, potrebno je da se primeni odgovarajući softver, np. onaj koji koristi IU. Sensori obavestavaju o ponašanju ili metodu komponente mosta (vibracije, savijanje, deformacija - ugiba -engl. deflection i dr.) u smislu OOP, ili kontrolišu servisne funkcije zgrade. U bazu podataka takođe se unose podaci o vrsti i položaju senzora.

Konačna dokumentacija IFC2x3 sadrži sledeće skupove karakteristika (engl. property sets) koji su od značaja za ovaj rad:

IfcIdentifikator; definisan kao alfanumerički niz koji dopušta identifikovanje pojedinačne stvari.

IfcMeraLinearneBrzine; mera brzine tela merena udaljenošću pređenom u jedinici vremena (m/s).

IfcMeraUčestanosti; mera broja vibracija nekog predmeta u jedinici vremena (1/s).

IfcMeraUbrzanja; mera ubrzanja (m/s²).

IfcMeraElektričnogNapona; za elektromo-tornu silu (V).

Konačna dokumentacija IFC2x3 takođe definiše sledeće entitete koji su od interesa:

IfcKontrola Definicija IAI je: *IfcKontrola* je apstraktna generalizacija svih koncepcija što generalno kontrolišu ili ograničavaju proizvode ili procese. Može da zastupljena u vidu neke T.uslova, propisa, obavezne cene ili drugog zahteva primenjenog na proizvod ili proces čiji zahtevi i priprema moraju da budu ispunjeni. Kontrole se dodeljuju proizvodima, procesima, ili drugim objektima pomoću relacije *IfcDodeljivanjeKontroli*.

IfcElementKontroleRaspodele; Definicija IAI je: Element raspodele *IfcElementKontroleRaspodele* definiše prisustvo elemenata sistema automatske kontrole zgrade koji se koriste za kontrolu sistema raspodele:

– *Senzorski elementi* (*IfcSensor*: iz *IfcKGHDomen* šeme) koji mere promene kontrolisane promenljive (npr., temperatura, vlažnost, pritisak, protok, itd.).

– *Controleri* (*IfcControler* je dat u šemi *IfcKGHDomen*) koji su klasifikovani prema kontrolnoj radnji koju traže da se izvrši i odgovorni su za donošenje odluka o elementima koji se kontrolišu.

IfcNeppravilnaVremenskaSerija Definicija IAI: U nepravilnoj vremenskoj seriji, nepredvidivi protoci podataka stižu u nepredviđenim trenucima, ili se veći deo vremenskih pojava ne može okarakterisati ponavljanjem pojava. Slično je definisana i pravilna vremenska serija, ali njena primena ovde nije od značaja, jer su pojave koje se ovde imaju u vidu slučajne i nepredvidive.

IfcLokalnoPostavljanje definiše relativno postavljanje proizvoda (senzor) u odnosu na postavljanje drugog proizvoda ili apsolutno postavljanje proizvoda u kontekstu geometrijske reprezentacije projekta.

IfcLokalnoPostavljanje dopušta da *IfcProizvod* može da bude postavljen pomoću ovog entiteta *IfcLokalnoPostavljanje*.

IfcOsobineZvuka; Osobine zvuka su zvučna snaga ili zvučni pritisak u osam zvučnih oktava koji govori o snazi izvora zvuka ili njegovom slabljenju. Ovde može da se koristi klasa *IfcNapomena* za identifikaciju lokacije na kojoj su zabeležene osobine zvuka.

Entitet *IfcNapomena* je vrlo koristan jer može da sadrži A-prikaz za IU, tekst o prirodi greške, napomenu o oceni greške, vrstu senzora itd., a sa informatičke strane je detaljnije prikazana u tabelama 2 i 3.

Lokalno postavljanje napomene u odnosu na element konstrukcije se definiše entitetom *IfcLokalnoPostavljanje*.

PostavljanjeUOdnosuNa je relacija koja ukazuje na lokalno postavljanje *IfcElementaProstorneKonstrukcije*.

IfcTipSenzora Definicija IAI: *IfcTipSenzora* definiše pojedinačan tip senzora koji se koristi u sistemu kontrole, kao što je sistem automatske kontrole zgrade. Klasa *IfcTipSenzora* obuhvata sve vrste senzora. Skupovi karakteristika koji su u vezi sa *IfcTipSenzora* su definisani pomoću *IfcSkupOsobina* i povezani su relacijom *IfcDefinicijaObziromNaTip*.

Novi skupovi karakteristika u klasi *IfcTipSenzora* koji su deo najnovijeg izdanja IFC, od interesa za ovaj rad zbog mogućnosti primene su:

Pset_TipSenzoraSenzorKretanja

Pset_TipSenzoraSenzorPritiska

Pset_TipSenzoraSenzorZvuka.

Digitalni podaci IBR i NDE o praćenju mosta unose se u IFC bazu podataka, pri čemu su ulazni podaci obično napon, vreme ili dužina, što je dato na slici 4.

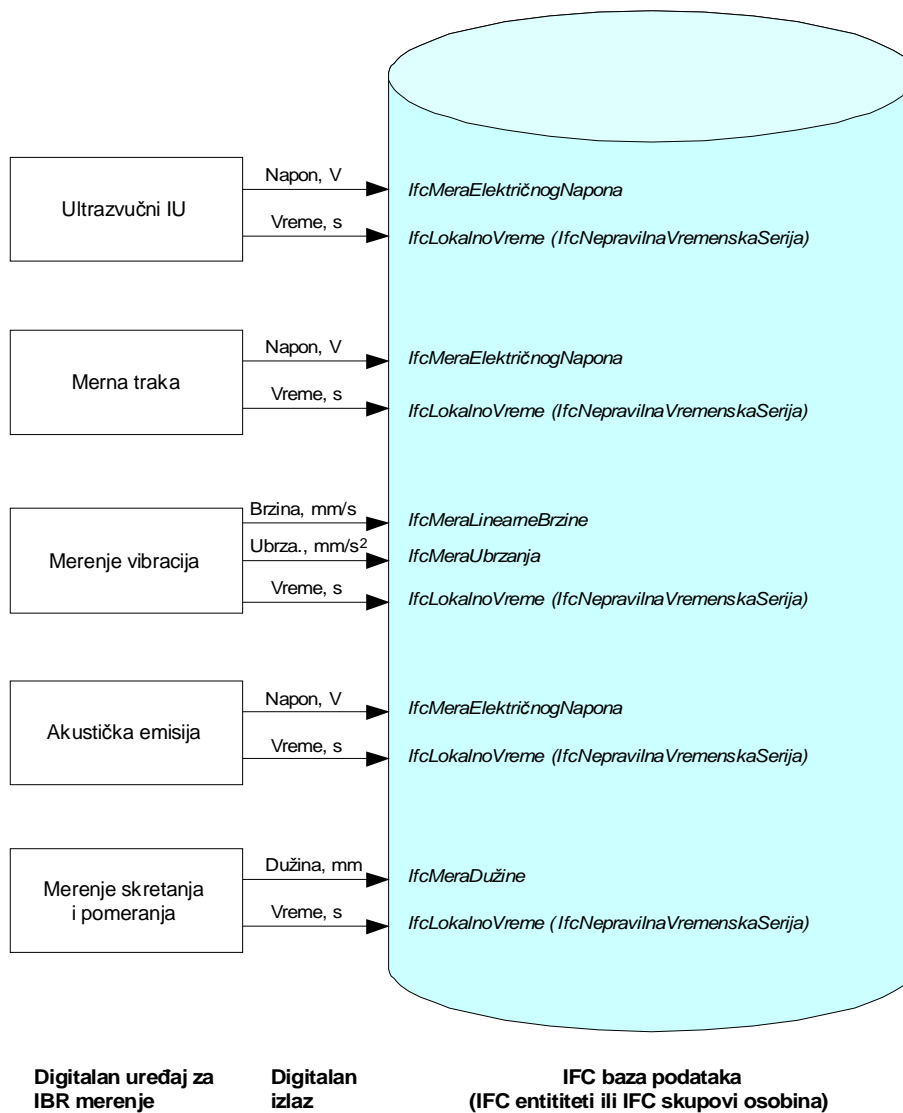
Definicija entiteta *IfcKoren* (ili *IfcOsnova*, u originalu *IfcRoot*) prema IAI glasi: *IfcKoren* je najapstraktnija i osnovna klasa svih definicija IFC entiteta koji imaju koren u jezgri ili u sledećim nivoima IFC modela objekta. To je zajednički supertip svih entiteta IFC, pored onih koji su definisani na nivou IFC podataka u tabeli 1. Svi entiteti koji su podtipovi od *IfcKoren* mogu da se koriste nezavisno, dok se za entitete na nivou podataka, koji nisu podtipovi od *IfcKoren*, ne smatra da su nezavisni.

Tabela 2. Lokalni i nasleđeni eksplicitni atributi entiteta *IfcNapomena*

Atribut	Tip	Definisani u
Globalni Id	<i>IfcGlobalniJedinstvenild</i> (niz)	<i>IfcKoren</i>
Opis	<i>IfcTekst</i> (niz)	<i>IfcKoren</i>
Tip Objekta	<i>IfcOznaka</i> (niz)	<i>IfcObjekt</i>
Postavljanje Objekta	<i>IfcPostavljanjeObjekta</i> (entitet)	<i>IfcProizvod</i>
Predstavljanje	<i>IfcPredstavljanjeObjekta</i> (entitet)	<i>IfcProizvod</i>

Tabela 3. Definicije koje navode entitet *IfcNapomena* i njegove supertipove [15,19]

Definicija	Tip	Entitet koji se navodi
<i>IfcKriterijumUslova</i>	ENTITET	<i>IfcKoren</i>
<i>IfcKorektnoDodeljivanjeObjekta</i>	FUNCTION	<i>IfcDefinicijaObjekta</i>
<i>IfcMontažaElementa</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcObjekt</i>	ENTITET	<i>IfcProizvod</i>
<i>IfcDefinicijaObjekta</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcPostavljanjeObjekta</i>	ENTITET	<i>IfcProizvod</i>
<i>IfcStub</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcProizvod</i>	ENTITET	<i>IfcNapomena</i>
<i>IfcSkupKarakteristika</i>	ENTITET	<i>IfcKoren</i>
<i>IfcOjačavajućaŠipka</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcDodeljivanjeNečemu</i>	ENTITET	<i>IfcDefinicijaObjekta</i>
<i>IfcDodeljivanjeProizvodu</i>	ENTITET	<i>IfcProizvod</i>
<i>IfcSadržanoUProstornojStrukturi</i>	ENTITET	<i>IfcProizvod</i>
<i>IfcFaktorRadnogVeka</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcElementProstorneStrukture</i>	ENTITET	<i>IfcDefinicijaObjekta</i>
<i>IfcTetiva</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>
<i>IfcRasporedVremenskogNiza</i>	ENTITET	<i>IfcObjekt</i>



Slika 4. Preslikavanje digitalnih NDE podataka na IFC entitete i skupove karakteristika

8 ZAKLJUČCI I DISKUSIJA

Sadašnje izdanje IFC2x3 omogućava da se memorišu podaci koji predstavljaju vremenske nizove događaja – električnih impulsa, koji se javljaju kao nepravilni ili pravilni (periodični) nizovi, jer ove klase postoje u navedenom izdanju IFC2x3. Osim toga, omogućena je identifikacija podataka kontrole i ispitivanja mosta u toku njegove izgradnje i korišćenja. Ovim su obuhvaćeni podaci kontinualne i povremene kontrole, u prvom redu pojava prslina, napredovanje korozije, nastupanje deformacije, podaci o vibracijama itd., koji mogu da se unesu u centralnu bazu podataka, obrađuju i kojima se može pristupiti sa različitih mesta i sa različitim softverima za njihovo analiziranje i prikazivanje. Međutim, IFC baza podataka još ne sadrži entitete potrebne za unos podataka koji se odnose na određene elemente (komponente) mosta i odstupanja oblika, kao što su deformacije.

9 LITERATURA

- [1] FHWA Home (<http://www.fhwa.dot.gov/>) (accessed: Feb. 16, 2008)
- [2] Salawu S. O. and Williams C., Review of full-scale dynamic testing of bridge structures, Engng Struct. 1995, Volume 17, Number 2, pp. 113-121.
- [3] Baraka A. M. and EL-SHAZLY H. A., Monitoring Bridge Deformations during Static Loading Tests Using GPS, „From Pharaohs to Geoinformatics“ - FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt April 16-21, 2005
- [4] Kamat R. V., El-Tawil S., Structure of an Augmented Situational Visualization Framework for Rapid Building Damage Evaluation, pp.101-107, pathfinder.engin.umich.edu/documents/Kamat&ElTawil.CONVR.2004.pdf (accessed: Feb. 16, 2008)
- [5] Jianjing J., Xinzhen L., Jingjun G., Study for Real-time Monitoring of Large-Span Bridge Using GPS, Proc. ISSST 2002, "Progress in Safety Science and Technology", Taiwan, Sep. 2002, pp.308-312.
- [6] Gethin W. R., Ewans A., Hollands R., Denby B., Cooper S., Dodson A., Look Beneath the Surface with Augmented Reality, GPS World, Feb 3, 2002 (accessed: Feb. 16, 2008)
- [7] Podaci f. Leica (TPS2000_brochure_en.pdf)
- [8] BRIDGE DECK CONDITION ASSESSMENT USING GROUND PENETRATING RADAR (<http://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=OFF&id=3585>) (accessed: Feb. 16, 2008)
- [9] Kirić M., Ultrazvučno ispitivanje sa C-slikom - primena na cevovode i zavarene spojeve, (Ultrasonic testing with C scan – the application to pipelines and welded joints), Integritet i vek konstrukcija, Vol. 6, br. 1-2 (2006), str. 41-52.
- [10] Hammad A., Motamedi A., Framework for lifecycle status tracking and visualisation of constructed facility components, 7th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, pp. 224-232, October 22-23, 2007.
- [11] Kirić M., Primena informatičko-tehnoloških standarda u kontroli i održavanju mostova pri ispitivanju bez razaranja, IVK, Vol. 7, br. 3 (2007), str.177-187
- [12] Krautkrämer: UltraDOC plus – Operating manual
- [13] Gallaher P. M. et al, Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry, NIST, August 2004, NIST GCR 04-867, <http://www.facilityinformationcouncil.org/bim/pdfs/04867.pdf> (accessed: Feb. 16, 2008)
- [14] IFC/ifcXML Specifications (http://en.wikipedia.org/wiki/Industry_Foundation_Classes#IFC.2FifcXML_Specifications#IFC.2FifcXML_Specifications) (accessed: Feb. 16, 2008)
- [15] <http://www.iai-tech.org/groups/msg-members/news/ifcxml2x3-final-published> (accessed: Feb. 16, 2008)
- [16] 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.
- [17] ISO/PAS 16739:2005 Industry Foundation Classes, Release 2x, Platform Specification (IFC2x Platform), 2005-10-11.
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Building_Information_Modeling
- [19] http://www.iai-international.org/Model/R2x3_final/index.htm (accessed: Feb. 16, 2008)

REZIME

O MOGUĆNOSTI PRIMENE IFC MODELA PODATAKA NA ISPITIVANJE MOSTOVA BEZ RAZARANJA

Miodrag KIRIĆ

Metodi ispitivanja i kontrole mostova, kao i elementi mosta u radu su razmotreni sa aspekta savremene baze podataka. Analizirana je primena informatičkog modelovanja zgrade (BIM) na praćenje i održavanje mostova metodama ispitivanja bez razaranja (IBR). Pokazana je mogućnost unosa rezultata ispitivanja i ocene pomoću digitalne ispitne opreme u IFC bazu podataka o mostu da bi se oni mogli koristiti za upravljanje mostom. Zahvaljujući primeni platforme specifikacije IFC2x3, ove podatke tada mogu da upotrebe mnogi korisnici i da im pristupaju pomoću različitih softverskih aplikacija.

Ključne reči: most, ispitivanje, senzor, entitet, Osnovne industrijske klase (IFC)

SUMMARY

ON THE APPLICATION OF A DATA MODEL TO NONDESTRUCTIVE BRIDGES TESTING

Miodrag KIRIĆ

Methods of testing and control of bridges, as well as bridge elements, are considered in the paper from the aspect of a modern database. It is considered the application of the building information modeling (BIM) to monitoring and maintenance of bridges using nondestructive testing methods (IBR). The possibility of loading data and estimations using digital test equipment into IFC database on bridge in order to make them available for bridge management is illustrated. Due to the application of the IFC2x3 Platform Specification, these data can share many users then and approach using different software applications.

Key words: bridge, testing, sensor, entity, Industry Foundation Classes (IFC)

NEURONSKE MREŽE-PRIMJENA ZA IZRADU PROGNOZNOG MODELA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA ZA VITKE ARMIRANO-BETONSKE STUBOVE

Miloš KNEŽEVIĆ
Radomir ZEJAK

ORIGINALNI NAUČNI RAD
UDK: 624.971.012.35.072.31:519.876.3.001.575 = 861

1 PROGNOZNI MODELI PRIMJENOM NEURONSKIH MREŽA

Kao osnov nastanka vještačkih neuronskih mreža (u literaturi poznatih kao neuronske mreže) uzima se analogija sa nervnim sistemom živih organizama.

Istorijski posmatrano nastanak neuronskih mreža se vezuje za 1943. godinu i članak *Warrena McCullocha* i *Walera Pittsa* "Logički račun ideja svojstvenih nervnoj aktivnosti". Nakon ovog inicijalnog rada veći broj naučnika se bavi ovom problematikom: *Donald Hebb*, *Marvin Minskz*, *Frank Rozenblatt*, *Charles Wightmann*, *Bernard Widrow*, *Sezour Papert*, *Teuvo Kohonen*, *Kunihiko Fukushima*, *Stephnen Grossberg*, *John Hopfield*, *Bart Kosko* i dr. [6].

Evoluciju nastanka vještačkih neuronskih mreža karakterišu pokušaji njihove primjene od modelovanja čulnih sistema živih bića, pa do primjena u mnogim oblastima ljudske djelatnosti. Neuronske mreže mijenjaju svoje ponašanje u zavisnosti od uticaja spoljašnjeg okruženja. Taj faktor je i uslovio njihove prve primjene u imitacionim modelima kognitivnih nauka. Paralelno sa progresom neuroanatomije i neurofiziologije psiholozi su razrađivali modele ljudskog učenja. Jedan od tih modela, koji se pokazao kao plodotvoran je model *Donalda Hebba* iz 1949 godine i predstavlja prvu primjenu algoritama za obučavanje vještačkih neuronskih mreža. U periodu 50-tih i 60-tih godina prošlog vijeka napravljene su i prve vještačke neuronske mreže. *Minskz*, *Rozenblatt*, *Widrow* i drugi naučnici razmatrali su mreže koje se sastoje od jednog sloja vještačkih neurona [7]. *Minskz* je koristeći tačne matematičke metode, strogo dokazao niz teorema koje se odnose na

funkcionisanje mreža. No, prelaz od perceptrona ka složenijim mrežama je bio razočaravajući. Nakon ukazanog perioda neuronske mreže su bile zaboravljene čitavih 20 godina.

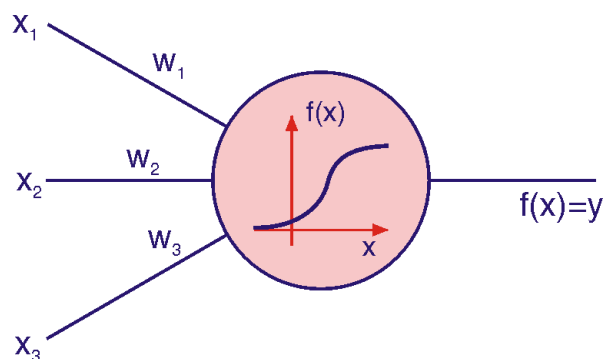
Neuronske mreže se simuliraju na računarima, ali naglašava se ogromna razlika između programiranja zasnovanog na algoritmima i pravilima i mreža zasnovanih na transformacijama. Takođe, naglašava se i veća brzina rada na neuronskim mrežama iz razloga paralelnosti uz primjenu paralelnih procesora.

No i pored ranog nastanka neuronske mreže su još uvijek u ranoj fazi razvoja, iako danas već imaju prilično širok spektar primjene u raznim disciplinama.

1.1 VJEŠTAČKI NEURON

Vještački neuron imitira biološki neuron. Na ulazu neurona (dendriti) imamo nekoliko signala od kojih se svaki javlja izlaznim signalom prethodnog neurona. Sinapse ulaznih neurona imaju pripadajuće težinske kriterije w_1, w_2, w_3, \dots , koji su analogni sinaptičkoj sili. Signali umnoženi težinskim koeficijentima se sumiraju i određuju nivo aktivizacije neurona.

Iako postoji veliki broj različitih mreža u osnovi svih je pomenuta konfiguracija koja je prikazana na slici 1.



Slika 1. Vještački neuron

Adresa autora:

Miloš Knežević, doktor tehničkih nauka, docent,
Građevinski fakultet Podgorica, Cetinjski put b.b., 81000
Podgorica
Radomir Zejak, doktor tehničkih nauka, docent,
Građevinski fakultet Podgorica, Cetinjski put b.b., 81000
Podgorica

Kada ka sinapsama dolaze impulsi x_1, x_2, x_3 , nakon umnožavanja istih sa težinskim kriterijima w_1, w_2, w_3 na ulazu neurona imamo impulse w_1x_1, w_2x_2 i w_3x_3 . Neuron dobija sumarni impuls $x = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3$. Nakon toga neuron obrađuje dobijeni impuls u skladu sa nekom funkcijom $f(x)$. Izlazni impuls jednak je $y = f(x) = f(w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3)$.

Ulazni signali koje možemo označiti vektorom X , odgovaraju signalima koji su ulazi za sinapse biološkog neurona. Težinske kriterijume možemo označiti vektorom W . I na kraju izlazne signale, možemo označiti kao $F = XW$.

1.2 NEURONSKE MREŽE - TEORIJSKE POSTAVKE

Arhitekturu neuronskih mreža čini veliki broj neurona povezanih međusobno u vidu mreže. Funkcije predaje impulsa u mreži su fiksirane, a težinski koeficijenti su promjenjivi.

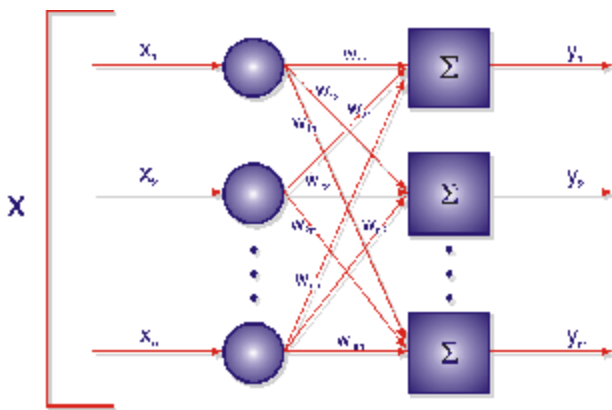
Arhitektonski se složenost mreže ogleda u broju slojeva. Svaki sloj prima inpute od prethodnog sloja i šalje outpute narednom sloju. Prvi sloj je ulazni, posljednji je izlazni. Na osnovu ulaznih podataka koji su definisani ulaznim vektorom, nakon korekcije sa težinskim kriterijumima, dobijaju se izlazni podaci.

Prvi sloj mreže prima podatke iz okruženja. Nakon obrade podataka u tzv. skrivenim slojevima, gdje se vrši obrada, podaci se šalju izlaznom sloju mreže. Na slici 2. je prikazan model jednoslojne neuronske mreže.

Očigledno je da su težinski koeficijenti elementi matrice W , koja ima n redova i m kolona. Znači da npr. težinski koeficijent w_{13} predstavlja treći izlaz na prvom neuronu. Komponente izlaznog vektora N svode se na množenje matrica $N = XW$, gdje su i N i W matrice kolone.

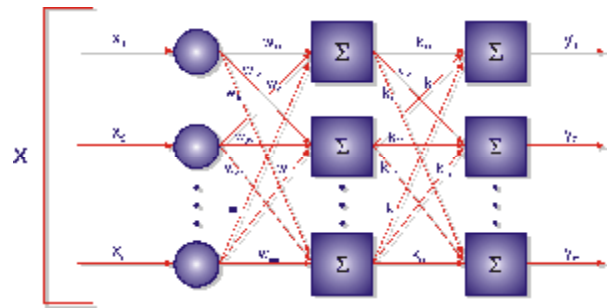
Za prikazanu dvoslojnu neuronsku mrežu može se reći da ukoliko nema nelinearne aktivacije, rezultirajući vektor bi bio jednak:

$$N = (XW_1)W_2$$



Slika 2. Jednoslojna neuronska mreža

Na slici 3. prikazan je model dvoslojne neuronske mreže.



Slika 3. Dvoslojna neuronska mreža

Zbog asocijativne osobine množenja matrica, isto bi zapisali kao: $N = X(W_1W_2)$, što bi u osnovi značilo da smo dvoslojnu neuronsku mrežu preveli u jednoslojnu sa težinskim koeficijentima w_{mwn} . Kako nam to nije cilj neophodno je neuronima omogućiti nelinearnost uz pomoć tzv. aktivacionih funkcija.

1.3 AKTIVACIONE FUNKCIJE

Skriveni slojevi neurona imaju aktivacione funkcije. Razlog leži u činjenici da je neophodno da mreža "nauči" nelinearne funkcije, jer bi se u protivnom kombinacijom linearnih funkcija dobila bi se nanovo linearna funkcija.

Na slici 4. je prikazan neuron sa aktivacionom funkcijom.

Aktivacione funkcije su najčešće nelinearne.

Kao aktivacione funkcije moguće je koristiti širok spektar nelinearnih funkcija.

Neke od često korišćenih funkcija (

Slika 5.) slijede:

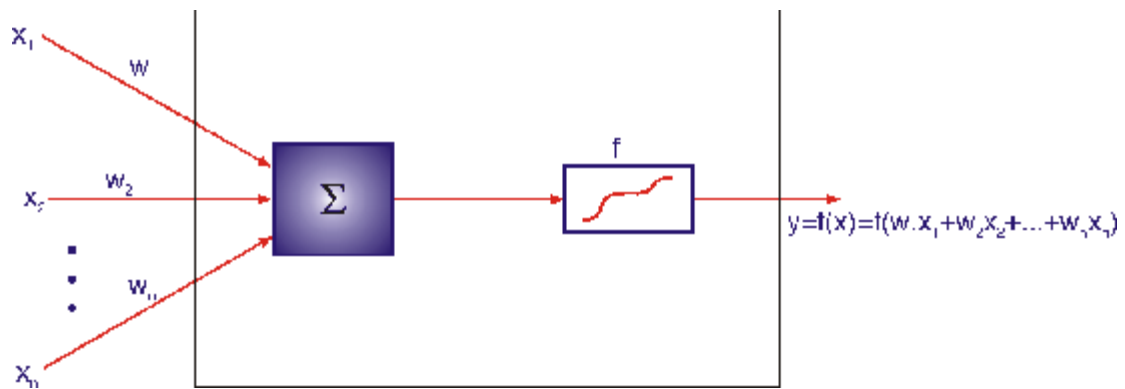
- U svim funkcijama q predstavlja promjenu stanja i naziva se aktivacionim pragom neurona.

- U primjenama neuronskih mreža jako često se upotrebljavaju sigmoidalne funkcije (tangens hiperbolički i logistička funkcija) iz razloga diferencijabilnosti i jednostavnog određivanja izvoda ovih funkcija. Za razliku od sigmoidalno logističke funkcije tangens hiperbolični ima i negativne vrijednosti što je u nekim primjenama jako poželjno.

Iako su pomenute dvije od najčešće korišćenih funkcija, treba naglasiti da se svaka nelinearna funkcija može koristiti kao aktivaciona. Ukoliko su ciljne vrijednosti u ograničenom domenu najbolje je koristiti ograničene funkcije.

Za realizaciju neuronske mreže potrebno je:

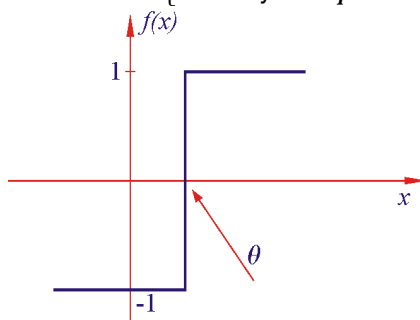
- projektovati arhitekturu mreže,
- odrediti težinske kriterijume, i
- obučiti mrežu.



Slika 4. Neuron sa aktivacionom funkcijom

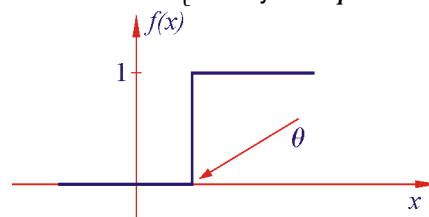
- odskočna funkcija oblika

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } x \geq q \\ -1 & \text{ako je } x < q \end{cases}$$



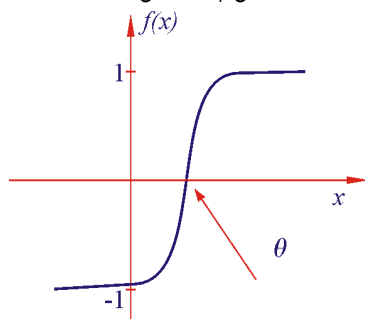
- odskočna funkcija oblika

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{ako je } x \geq q \\ 0 & \text{ako je } x < q \end{cases}$$



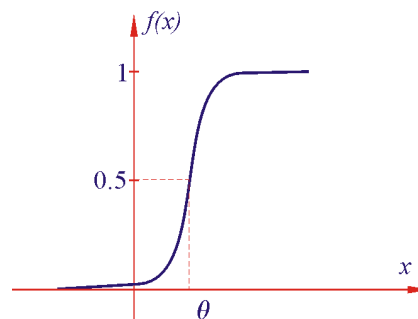
- tangens hiperbolični

$$f(x) = \frac{e^{(x-q)} - e^{-(x-q)}}{e^{(x-q)} + e^{-(x-q)}}$$



- logistička funkcija

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-q)}}$$



Slika 5. Najčešće primjenljivane aktivacione funkcije

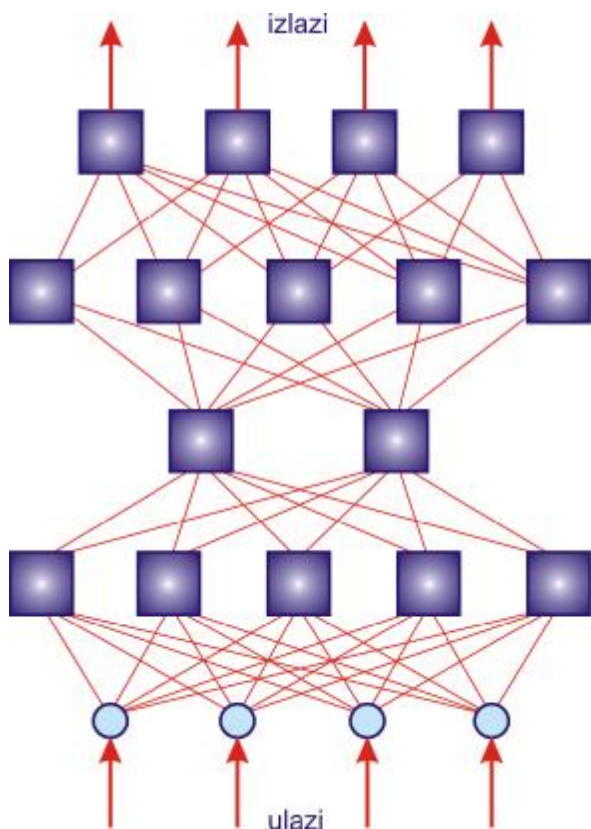
1.4 PROJEKTOVANJE ARHITEKTURE NEURONSKE MREŽE

Projektovanje arhitekture mreže podrazumijeva:

- izbor neurona (broj ulaza, aktivacione funkcije),
- formiranje mrežne strukture, i
- određivanje ulazno-izlaznih komponenti mreže.

Projektovanje arhitekture neuronskih mreža bazira se na korišćenju nekoliko desetina različitih arhitektonskih formi mreža koje su matematički dokazane. Takve su mnogoslojni perceptron, neuromreža sa opštom regresijom, mreža *Kohonena*, mreža *Hopfilda* i dr.

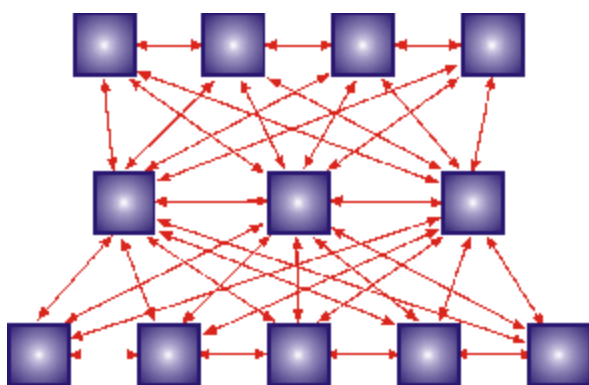
U pogledu projektovanja arhitekture neuronskih mreža može se reći da one predstavljaju veći broj neurona povezujući izlaze prethodnih slojeva sa ulazima narednih slojeva. Ulazni neuroni prihvataju informacije iz okruženja dok naredni slojevi neurona prihvataju i prenose informaciju iz prethodnih slojeva ka izlaznom sloju koji generišu na taj način određene akcije. Pored ulaznog i izlaznog sloja mreže svi ostali slojevi se nazivaju skrivenim slojevima. Već je rečeno da W_{ij} predstavlja težinski koeficijent veze od i -tog neurona. Arhitekturu mreže u potpunosti definiše matrica $W=(W_{ij})N \times N$ pri čemu je za nepovezane $W_{ij}=0$. N predstavlja ukupan broj neurona u mreži.



Slika 6. Nerekurentna neuronska mreža

Na slici 6 je predstavljena nerekurentna neuronska mreža sa više slojeva. Uočava se da između neurona u istom sloju ne postoji međuzavisnost. Protok informacija kroz mrežu je jednosmjernan od ulaza ka izlazu.

Ističe se činjenica da su ipak rekurentne neuronske mreže bliže prirodi nervnog sistema zbog povratnih sprega između neurona (Slika 7). Ipak, nerekurentnim mrežama se može riješiti širok spektar problema, jednostavnije su za upotrebu i brže se "obučavaju".



Slika 7. Rekurentna neuronska mreža

Celularne mreže imaju međusobno povezane samo susjedni neuroni, ali se informacija indirektno prostire i na neurone i van susjednih neurona.

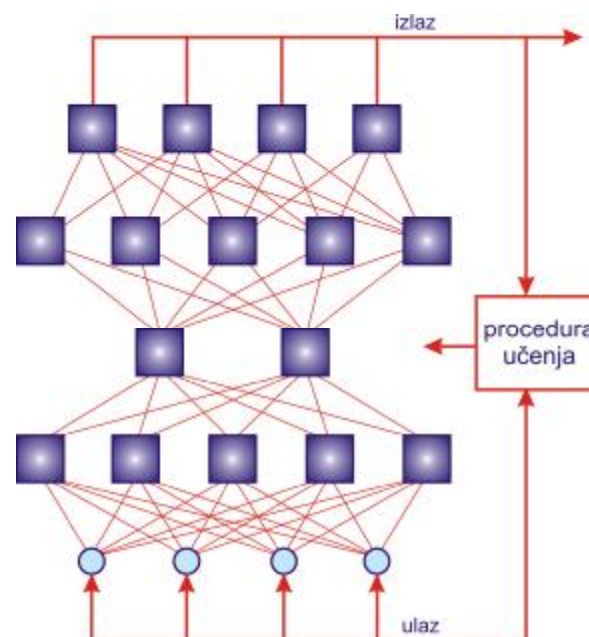
1.5 OBUČAVANJE NEURONSKIH MREŽA

Ponašanje neuronske mreže zavisi od ukupnog broja neurona, tj. od arhitekture mreže, od težinskih koeficijenata kojima su povezani neuroni i od aktivacione funkcije koja je korišćena za realizaciju mreže.

Da bi se pristupilo obučavanju neuronske mreže potrebno je uočiti da je najjednostavniji način mijenjati težinske koeficijente čime će neuronska mreža odreagovati promjenom izlaznih signala.

Promjene težinskih koeficijenata nazivaju se procedurama obučavanja mreže. (slika 8).

Prikazani proces obučavanja mreže je bez nadgledanja, tj. mreža sama uočava pravilnosti u ulaznim podacima, i definiše korekcije težinskih kriterijuma.



Slika 8. Procedure obučavanja neuronske mreže

Postoje i tipovi nadgledanog obučavanja mreža gdje postoji tzv. "učitelj" koji odziv mreže definiše sa usiljenom vrijednošću i vrši korekciju težinskih koeficijenata.

Obučavanje mreže može biti laboratorijsko na trening skupu. Ovo je jako prihvatljiv način obučavanja jer se mreža obučava van buduće radne sredine uz uslov da se odabere skup ulaza i izlaza koji će vjerno odslikati ponašanje sredine. Na osnovu trening skupa se odrede težinski koeficijenti, isti se fiksiraju i mreža se stavlja u eksploataciju. Ovaj oblik obučavanja predstavlja nadgledano učenje.

Bliže prirodnom nervnom sistemu je obučavanje mreže u toku eksploatacije, tj. nenadgledano obučavanje. Ovakav način obučavanja mreže je najpribližniji prirodi neurona. Međutim, ovakvo

obučavanje u prvim fazama daje nepouzdana izlaze, ali se povećanjem trening skupa rezultati su pouzdaniji.

Nadgledano obučavanje može se obaviti na način zadavanja inicijalnih težinskih koeficijenata mreži, a nakon toga se mogu korigovati na dva načina i to:

– korekcija težinskih koeficijenata nakon unosa svakog podatka iz trening skupa, pri čemu se obučavanje zasniva na korekciji greške ili

– korekcija težinskih koeficijenata nakon unosa cjelokupnog trening skupa pri čemu se koriste gradijentna pravila.

Promjena težinskog kriterijuma u prvom slučaju predstavlja korekciju greške i iznosi:

$$DW_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial e_k(W^{(e+k-1)})}{\partial W_i}, \text{ gdje je } e - \text{ greška.}$$

U drugom slučaju ova promjena je ukupna i iznosi

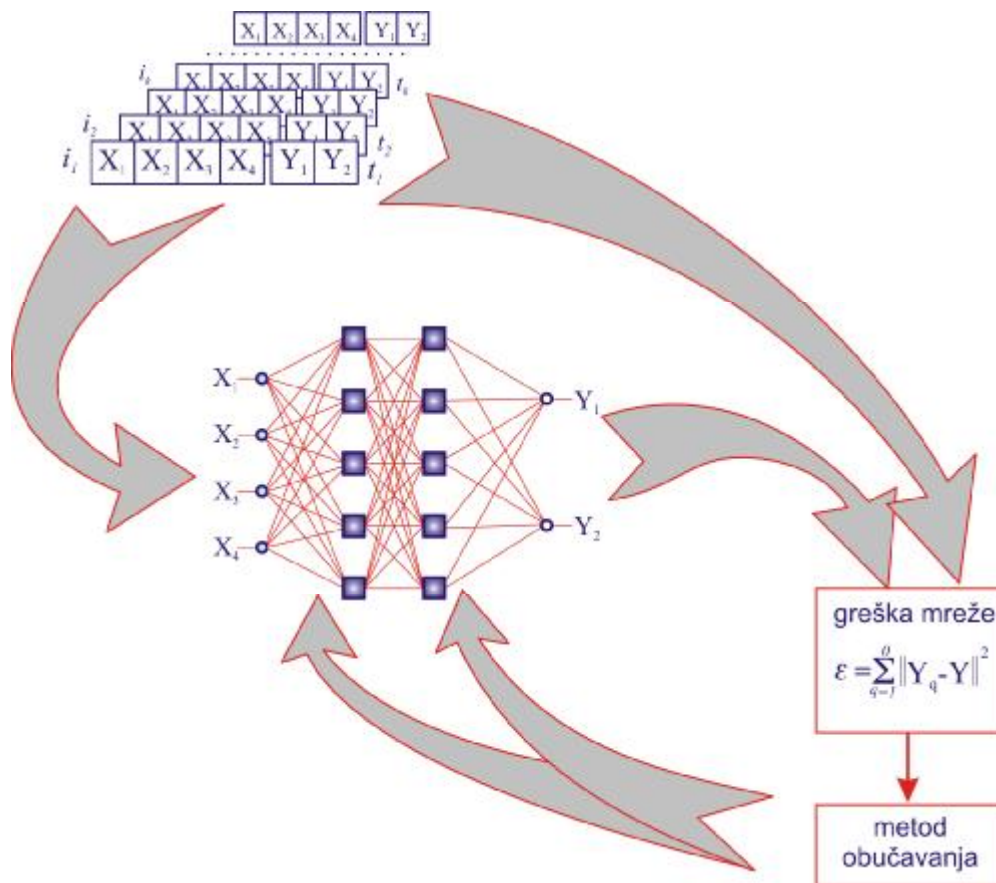
$$DW_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial e_k(W^{(e)})}{\partial W_i}, \text{ gdje se uočava}$$

minimiziranje greške za cio trening skup, tj. funkcije

$$e = \sum_{k=1}^N e_k.$$

1.6 BACKPROPAGATION ALGORITAM

Backpropagation je algoritam za obučavanje neuronske mreže, koji je najčešće u upotrebi. Nastao je kroz nezavisna istraživanja: *Paul Werbos* ([3]) (1974), *David Parker* ([4]) (1982), i *David Rumelhart, G.E. Hinton, Ronald Williams* ([5]) (1986).



Slika 9. Algoritam rada *Backpropagation* algoritma ([9])

Obučavanje mreže pomoću *Backpropagation algoritma* obavlja se periodičnim propuštanjem podataka iz trening skupa kroz neuronsku mrežu. Dobljene vrijednosti se upoređuju sa stvarnim izlazima i ukoliko se javi razlika vrši se korekcija težinskih koeficijenata. Algoritam rada *Backpropagation algoritma* je prikazan na slici 9.

Korekcija težinskih koeficijenata se obavlja u iterativnom postupku i putevi neurona koji su manje korišćeni »atrofiraju« dok se signal kroz korišćene neurone pojačava. Nakon podešavanja težina kroz

iteracije mreža nauči da reaguje na željeni način. Nakon obučavanja mreža će imati sposobnost generalizacije novih ulaznih podataka za koje nije obučavana.

U literaturi je definisan *Backpropagation algoritam* na različite načine. Ovdje se daje definisanje prema literaturi ([6]).

Uvedimo oznake:

- n – broj ulaza mreže,
- m – broj izlaza mreže,
- trening skup $P=(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{Np})$,
- $pk = (rk, tk)$ - trening uzorak iz trening skupa P ,

- $ik = (i1k, i2k, i3k, \dots, ink)T$ vektor ulaznih signala iz trening uzorka pk ,
- $tk = (t1k, t2k, t3k, \dots, tmk)T$, vektor izlaznih signala iz trening uzorka pk ,
- $w_{ij}^{(l)}$ – težinski koeficijenti u sloju l ,
- NL – broj slojeva u mreži,
- M – broj neurona u sloju l ,
- $z_j^{(l)}$ – neuron u sloju j ,
- v_{ik} – izlaz neurona $z_j^{(l)}$ kada mrežu pobudi ik ,
- $x_{jk}^{(l)}$ – aktivacioni signal neurona $z_j^{(l)}$ kada je ik na ulazu mreže,
- $u_{ijk}^{(l)}$ – signal na i -tom ulazu neurona $z_j^{(l)}$ kada je mreža pobuđena sa ik ,
- $f_i^{(l)}(x)$ – aktivaciona funkcija neurona $z_j^{(l)}$,
- $ok = (o1k, o2k, o3k, \dots, omk)$ – odziv mreže na pobudu ik .

Za višeslojne mreže važi:

- $o_{ik} = v_{ik}(NL)$ – izlaz mreže je izlaz neurona u posljednjem sloju NL ,
- $u_{ijk}^{(l)} = v_{ik}^{(l-1)}$ – na i -ti ulaz neurona $z_j^{(l)}$ se dovodi izlaz neurona $z_j^{(l-1)}$
- $v_{ik}^{(0)} = i_{ik}$ – neuron $v_{ik}^{(0)}$ u ulaznom sloju je pobuđen sa ulaznim signalom i_{ik} i linearnom aktivacionom funkcijom,

Za linearnu funkciju ulaza aktivacioni signal neurona $z_j^{(l)}$ je:

$$x_{jk}^{(l)} = \sum_{i=0}^{N_{l-1}} w_{ij}^{(l)} u_{ijk}^{(l)} = \sum_{i=0}^{N_{l-1}} w_{ij}^{(l)} v_{ik}^{(l-1)}$$

Izlazni signal neurona je:

$$v_{jk}^{(l)} = f_j^{(l)}(x_{jk}^{(l)}).$$

Mreža Backpropagation je data na slici 10.

Funkcija greške je definisana kao:

$$e_k = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n (o_{sk} - t_{sk})^2 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^n (v_{sk}^{(NL)} - t_{sk})^2$$

i predstavlja minimiziranje razlike između željenog odziva tk i odziva mreže ok usljed pobude ik .

Za iterativno određivanje težina veza računaju se parcijalni izvodi funkcije greške:

$$\frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}} = \frac{\partial e_k}{\partial x_{jk}^{(l)}} = \frac{\partial x_{jk}^{(l)}}{\partial w_{ij}^{(l)}}$$

Kako je iz:

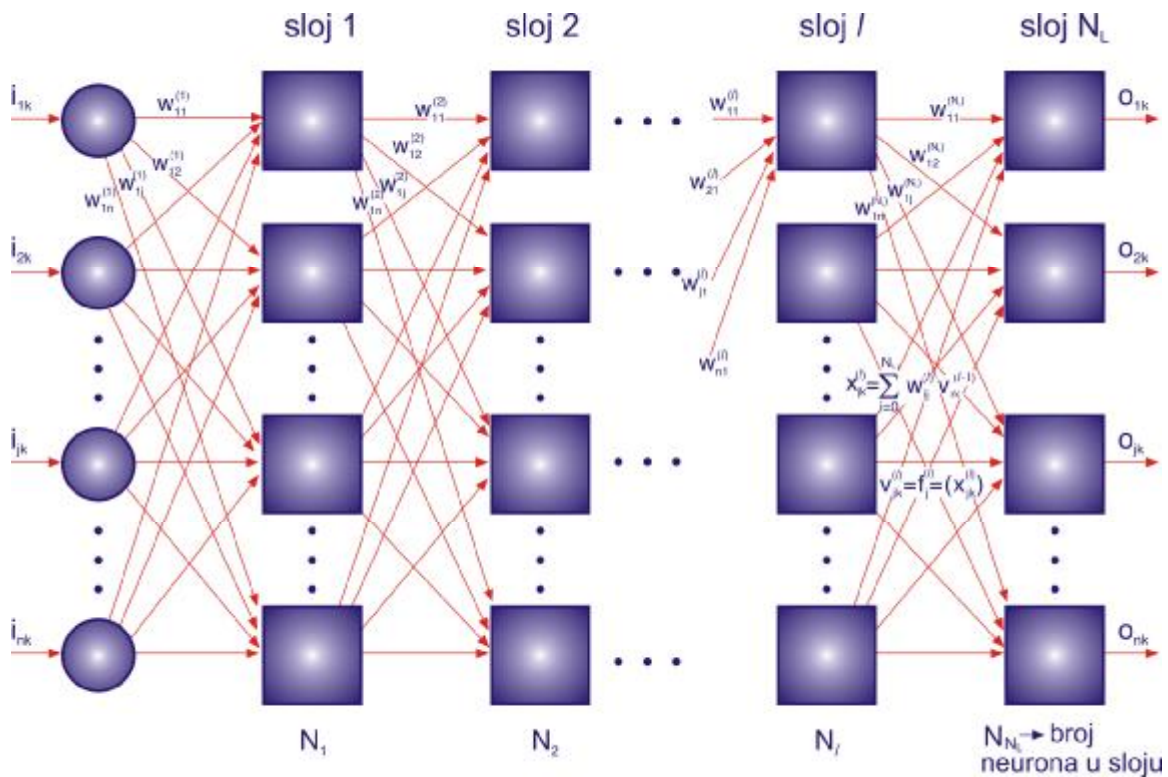
$$x_{jk}^{(l)} = \sum_{i=0}^{N_{l-1}} w_{ij}^{(l)} v_{ik}^{(l-1)}, \quad \frac{\partial x_{jk}^{(l)}}{\partial w_{ij}^{(l)}} = v_{ik}^{(l-1)}, \quad \text{tada važi}$$

$$\frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}} = d_{jk}^{(l)} v_{ik}^{(l-1)}, \quad \text{gdje je}$$

$$d_{jk}^{(l)} = \frac{\partial e_k}{\partial x_{jk}^{(l)}}.$$

Za izlazni sloj je:

$$d_{1k}^{(NL)} = (o_{jk} - t_{jk}) f_j^{\prime(NL)}(x_{jk}^{(NL)}).$$



Slika 10. Mreža Backpropagation

Za skrivene slojeve je:

$$d_{jk}^{(l)} = \frac{\partial e_k}{\partial v_{jk}^{(l)}} \frac{\partial v_{jk}^{(l)}}{\partial x_{jk}^{(l)}} = \frac{\partial e_k}{\partial v_{jk}^{(l)}} f_j^{(l)}(x_{jk}^{(l)}) = f_j^{(l)'}(x_{jk}^{(l)}) \sum_{s=1}^{N_{l+1}} \frac{\partial e_k}{\partial x_{sk}^{(l+1)}} \frac{\partial x_{sk}^{(l+1)}}{\partial v_{jk}^{(l)}} = f_j^{(l)'}(x_{jk}^{(l)}) \sum_{s=1}^{N_{l+1}} \frac{\partial e_k}{\partial x_{sk}^{(l+1)}} w_{jk}^{(l)}$$

Zamjenom: $d_{jk}^{(l)} = \frac{\partial e_k}{\partial x_{jk}^{(l)}}$,

dobija se $d_{jk}^{(l)} = f_j^{(l)'}(x_{jk}^{(l)}) \sum_{s=1}^{N_{l+1}} d_{sk}^{(l+1)} w_{js}^{(l+1)}$.

Računanje se obavlja u dvije faze i to forward faza (unaprijed) i faza podešavanja težina. Težine se podešavaju pravilom gradijentnog spusta:

$$w_{ij}^{(l)\text{new}} = w_{ij}^{(l)\text{old}} - \eta \frac{\partial \epsilon_k}{\partial w_{ij}^{(l)}}$$

Druga faza je backforward faza (unazad).

Za korišćenje Backpropagation algoritma zahtijeva se diferencijabilnost aktivacione funkcije. Najčešće su u primjeni sigmoidalne funkcije iz razloga njihovog jednostavnog računanja izvoda i njihove osobine univerzalnog aproksimatora.

Za logističku funkciju:

$$y = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \text{ izvod je}$$

$$y' = \frac{df(x)}{dx} = y(1 - y),$$

pa neuroni postaju:

$$d_{1k}^{(N_L)} = o_{jk}(1 - o_{jk})(o_{jk} - t_{jk})$$

$$d_{jk}^{(l)} = v_{jk}^{(l)}(1 - v_{jk}^{(l)}) \sum_{s=1}^{N_{l+1}} d_{sk}^{(l+1)} w_{js}^{(l+1)}$$

Ovako definisan algoritam ima loših osobina zbog sporog obučavanja mreže. Zbog nelinearnosti aktivacione funkcije greške su nelinearne funkcije težina koje mogu posjedovati lokalne minimume.

Rješenje ovog problema je definisano u literaturi ([8]).

Ako je $Dw_{ij}^{(l)}(t)$ promjena težine $w_{ij}^{(l)}$ u t -oj

prezentaciji uzorka tada: $Dw_{ij}^{(l)}(t) = -h \frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}}$, gdje je

e_k –greška u odzivu mreže za trening uzorak pk . Povećanje brzine učenja se postiže uvođenjem momenta, kako bi promjena težina u trenutku t zavisila od promjene u prethodnom momentu:

$$Dw_{ij}^{(l)}(t) = -h \frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}} + a DDw_{ij}^{(l)}(t-1) \quad 0 < a < 1.$$

Obučavanje mreže se vrši izborom koeficijenata h i a . U početku obučavanja optimizacioni proces je daleko od minimuma i treba birati male vrijednosti h i a , a kasnije veće, bez bojazni od divergencije.

1.7 UNIVERZALNOST AKTIVACIONE FUNKCIJE

Opisani algoritam za učenje neuronske mreže pripada klasi statičkih algoritama iz razloga statičnosti arhitekture mreže koja je unaprijed zadata. U literaturi se sreće veliki broj mreža koje su matematički obrazložene i imaju arhitekturu koja je prilagođena problematiki koja se rješava. Takve su mreže ćelijske strukture, Kohonen-ova mreža, Hopfield-ova mreža i dr.

Danas se u svijetu radi jako veliki broj istraživanja za dinamičke procedure učenja mreža, koje podrazumijevaju promjenu arhitekture mreže u zavisnosti od problema koji se rješava. Na taj način dinamičko učenje automatski prilagođava arhitekturu mreže problemu. Zavisnost ovog prilagođavanja je uslovljena složenošću problema.

Od neuronske mreže se očekuje da izvrši generalizaciju podataka, tj. da prihvatljiv prognozni model za podatke van trening skupa. U nastavku se posvećuje pažnja istraživanjima koja su rađena u svijetu, a u pogledu istraživanja ovog problema.

Ispitujući troslojne neuronske mreže sa binarnim neuronima Baum i Haussler ([10]) su prikazali zavisnost generalizacije od trening skupa. Zaključci koji se iz ovog rada izvode su sljedeći:

- ako se želi tačnost rezultata od 90%, broj trening uzoraka mora biti makar 10 puta veći od broja nepoznatih parametara mreže,

- bolju generalizaciju daju mreže sa manjim brojem parametara za fiksiran trening skup i

- realan odziv mreža će dati u slučaju malih razlika ulaznih podataka u odnosu na trening skup (nerealno je očekivati dobru generalizaciju za veliko odstupanje).

Iz ovih zaključaka da se apsolvirati da je problem definisanja arhitekture mreže još uvijek dovoljno nedefinisan. Razlog leži u činjenici da optimalna arhitektura mreže mora odgovoriti na dva zahtjeva, tj.:

- da mreža bude dovoljno mala da bi generalizacija bila adekvatnija i

- da bude dovoljno velika da nauči trening skup.

Za mrežu sa n ulaza i m izlaza obučavanje predstavlja preslikavanje:

$$F : R^n \rightarrow R^m$$

koje povezuje ulazne i izlazne vektore. Mogućnost obučavanja mreže zavisi od aktivacione funkcije. Naime, da bi mreža mogla služiti za rješavanje proizvoljnih zadataka postavlja se zahtjev univerzalnosti aktivacione funkcije.

U velikom broju radova istraživači su pokazali univerzalnost sigmoidnih funkcija u rješavanju problema. U radovima ([9]), ([12]) dokazuje se da višeslojne mreže sa minimalno jednim skrivenim slojem mogu aproksimirati bilo koju kontinualnu funkciju sa proizvoljnom tačnošću uz uslov da aktivaciona funkcija nije polinom.

Izvodi se zaključak da neuronska mreža koja je minimalno troslojna sa jednim skrivenim slojem i ima

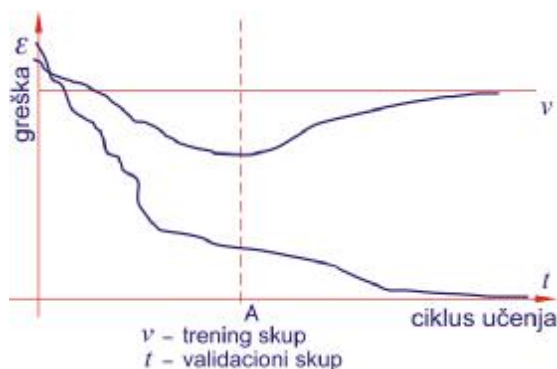
sigmoidalnu aktivacionu funkciju, tj. linearnu funkciju u izlaznom sloju predstavlja univerzalni aproksimator.

1.8 POBOLJŠANJE GENERALIZACIJE ZA PROGNOZNI MODEL

Obučavanje neuronske mreže može se vršiti u nizu pokušaja na način da se nekom od statičkih procedura "uče" mreže različite arhitekture. Obučavanje se vrši do zadovoljavajućeg odstupanja od trening uzorka. Procedura se obavlja na nizu od najmanje tri mreže različite arhitekture i nakon obučavanja sve tri mreže sa zadovoljavajućim odstupanjima od trening skupa, bira se ona mreža koja ima najmanji broj neurona u skrivenim slojevima.

Za kompleksnije probleme ovaj način rješavanja predstavlja obiman posao. Iz tog razloga najčešće se u primjenama neuronskih mreža, a za rješavanje najvećeg broja problema koristi uvođenje još jednog skupa podataka, koji predstavlja skup za validaciju mreže. Validacioni skup podataka predstavlja dio raspoloživog skupa podataka, pri čemu je broj podataka u trening skupu veći od broja u validacionom skupu, uz uslov da je distribucija uzoraka u oba skupa jednaka.

Greška koja se generiše iz trening skupa podataka, nakon većeg broja iteracija ima tendenciju opadanja, dok je slučaj greške kod validacionog skupa nešto drugačiji, tj. greška se u nekom intervalu smanjuje, a kasnije uvećava (slika 11).



Slika 11. Odnos greške na trening i validacionom skupu podataka.

Čitav proces se sastoji u zaustavljanju učenja u tački A, tj. kada je generalizacija parametara zadovoljavajuća.

2 PRIMJENA NEURONSKE MREŽE ZA IZRADU PROGNOZNOG MODELA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA ZA VITKE ARMIRANO-BETONSKE STUBOVE

Na primjeru jednog naučnoistraživačkog projekta, koji pored ostalog sadrži i rezultate eksperimentalnih ispitivanja na 22 modela armiranobetonskih vitkih stubova, biće prikazana primjena izrade prognoznog modela uz pomoć neuronske mreže.

Istraživanje je sprovedeno na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici na vitkim

armirano betonskim stubovima pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja.

Primjena neuronske mreže u izradi prognoznog modela za graničnu silu i maksimalne ugibe u pravcima glavnih centralnih osa inercije u odnosu na variranih šest ulaznih parametara pokazuju zadovoljavajuće rezultate.

Nakon obučavanja neuronske mreže izvršeno je upoređenje rezultata prognoze za parametre granične sile, a takođe data prognoza za maksimalne ugibe u pravcima glavnih centralnih osa inercije.

2.1 UVOD

Poznato je da su analize i metode proračuna armiranobetonskih konstrukcija u drugoj polovini 20. vijeka, vezane za teoriju graničnih stanja, koja je i danas aktuelna u ovoj oblasti. Svjedoci smo prave revolucije u izučavanju raznih fenomena koji se javljaju u primjeni armiranobetonskih konstrukcija, a brojna su teorijska i eksperimentalna istraživanja tih problema kao i potvrde saznanja o njima na osnovu verifikacije u inženjerskoj praksi. Pri tome su pojedine oblasti, za istraživače, bile više interesantne, pa su analizirane skoro u cjelini, dok su, pak, neke ostajale samo na nivou identifikacije pojedinih fenomena i tim dijelovima nije posvećeno dovoljno pažnje. Treba naglasiti da su razlozi za to bili najčešće vezani za prirodu samog problema kao i strukturu i obim takvih istraživanja, budući da rezultati nekih analiza pokazuju značajnu osjetljivost u odnosu na veliki broj uticajnih parametara. Čini se da ovoj grupi pripada i oblast armiranobetonskih vitkih elemenata kod kojih se posebno izdvajaju elementi savijani podužnom silom pritiska, koja je ekscentrična u odnosu na obje glavne centralne ose inercije poprečnog presjeka.

Pri projektovanju armiranobetonskih konstrukcija često se javlja potreba za primjenom ovakvih vitkih konstrukcijskih elemenata. Od motiva koji inženjera projektanta navode na traganje za elegantnim konstrukcijskim elementima izdvajaju se: mogućnost primjene betona visoke čvrstoće (high strength concrete) i savremene tehnologije u proizvodnji ab elemenata; smanjenje sopstvene težine, a time i uticaja u elementima; estetski, a vrlo često i ekonomski faktori.

Ovoj oblasti pripadaju svi vitki štapovi bilo da su nezavisni ili su dio nekog konstrukcijskog sistema (rešetkasti nosači, ramovski nosači i sl.). Tipični predstavnici ovakvih elemenata su stubovi prostornih ramova, a kako su u armiranom betonu neminovne netačnosti pri izvođenju, a zatim i nesigurnosti prilikom usvajanja proračunskog modela posebno sa porastom vitkosti, razumno je i stubove ravanskih sistema svrstati u ovu kategoriju. Uslovno se ovdje mogu svrstati i vitke grede, kao i površinski nosači koji, zbog lokalnog izbočavanja u svojoj ravni, mogu doći u ovakvo naponsko stanje (visoke grede, zidovi, ljsuke i sl.).

Prilikom proračuna AB štapova usljed dejstva sile pritiska koja je ekscentrična u odnosu na obje glavne centralne ose presjeka, često se postupa tako što se dimenzionisanje vrši odvojeno za svaku osu. Međutim takav proračun nije obično dovoljno tačan iz jednostavnog razloga, što se dio pritisnutog betona u analizi unutrašnjih sila koristi dva puta [9]. I pored toga ovakav pristup je zadržan u aktuelnim propisima tehnički razvijenih zemalja, u slučaju vitkih AB stubova

pravougaonog poprečnog presjeka, kod kojih je jedan od relativnih ekscentriciteta opterećenja mnogo manji od drugog, tj. ako se normalna sila pritiska nalazi relativno blizu jedne od glavnih centralnih osa. Ako ovaj uslov nije ispunjen neophodna je detaljna analiza, odnosno potrebno je sprovesti tačniji proračun.

Osnovni problem koji se javlja u ovoj analizi jeste geometrijska i materijalna nelinearnost, zbog čega se uslovi ravnoteže moraju postavljati na sistem u deformisanoj konfiguraciji uz nelinearno ponašanje armiranog betona. Poznato je još iz tehničke teorije elastičnosti da pri kosom savijanju neutralna ravan nije upravna na ravan opterećenja, a ravan deformacije (izvijanja) je pod određenim uglom zarotirana u pravcu kraće strane poprečnog presjeka. Ovo dodatno komplikuje proračun koji se, inače, sprovodi po teoriji II reda, jer se, povećanjem sile pritiska, pored prirasta deformacije, istovremeno mijenja i njen pravac. Na taj način pritisnuta površina AB presjeka, koja je inače nepravilnog oblika, postaje promjenljiva veličina sa porastom spoljašnjeg opterećenja. Pri svemu tome treba imati u vidu da beton predstavlja jedan nehomogeni materijal i da je spregnut sa drugim materijalom (armaturom) kako bi se formirali razni konstrukcijski elementi.

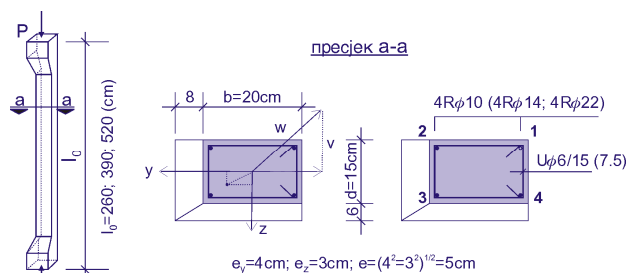
Na osnovu svega toga, može se konstatovati da je matematička formulacija za proračun ovakvog jednog problema veoma složena. Zato je razumljivo nastojanje mnogih autora da se problem pojednostavi uvođenjem aproksimativnih proračunskih metoda [9]. Eksperimentalna ispitivanja na raznim modelima, vezanim za ovu oblast, predstavljaju značajnu bazu podataka koja se može koristiti u cilju rasvjetljavanja ovako složenih inženjerskih zadataka. Sa druge strane, razvojem kompjuterske tehnike uz primjenu raznih numeričkih metoda proračuna, došlo je do svestranog napretka u izučavanju komplikovanih naponskih stanja i kvalitetne obrade eksperimentalnih podataka.

2.2 KARAKTERISTIKE ISPITIVANIH MODELA

Eksperimentalna ispitivanja su sprovedena na armiranobetonskim stubovima, koji su opterećivani do loma, uz varijaciju osnovnih uticajnih parametara. Prije početka glavnog eksperimenta ispitivano je u dva navrata po 3 probna modela radi provjere funkcionisanja kompletne opreme, mjerne tehnike i konstrukcije uređaja za ispitivanje stubova. Nakon toga je u glavnom eksperimentu testirano ukupno $n=22$ stubova na kratkotrajno opterećenje u realnoj razmjeri sa konstantnim dimenzijama poprečnog presjeka $b/d=15/20$ cm, koji sadrže uobičajene procenante podužne armature i uzengija (slika 12). Svi armiranobetonski modeli stubova su ekscentrično opterećeni ($e_z/d=e_y/b=e/dk=0.2$) aksijalnom silom pritiska u pravcu njihove podužne ose. U cilju što preciznijeg određivanja odgovora koso savijanih vitkih AB stubova varirani su dominantni uticajni faktori i to: karakteristična vitkost $I=(60, 90 \text{ i } 120)$; procenat ukupne podužne armature $m_A=(1.05, 2.05 \text{ i } 5.07)\%$; procenat poprečne armature-uzengija $m_U=(0.25, 0.50 \text{ i } 1.00)\%$, kao i različite čvrstoće betona f_b koje se neminovno javljaju u armiranom betonu pri izradi ispitnih modela. Radi upoređenja podataka dobijenih u odnosu na koso

savijanje, u sve tri serije različite vitkosti I , ispitivani su odgovarajući modeli sa centričnim pritiskom i sa pravim složenim savijanjem pojedinačno oko glavnih centralnih osa inercije presjeka.

Usvojen je konstantan poprečni presjek po visini stuba tako da je $b/d=1.333<1.5$, jer se, prema mnogim autorima, tada efekat kosog savijanja mora uvoditi u proračun bez obzira na položaj normalne sile u presjeku. Veličina relativnog ekscentriciteta $e/dk=0.2$ uzeta je tako da početni ekscentricitet bude što bliži jezgru presjeka, kako bi efekat izvijanja bio što značajniji.



Slika 12. Ispitivani model vitkog stuba; poprečni presjek

Usvojeni procenti armiranja podužnom i poprečnom armaturom (tabela 1) najčešće su u primjeni i takođe daju dobar pregled u pogledu promjene nosivosti za koso savijane ekscentrično opterećene vitke stubove. Različite veličine čvrstoće pri pritisku betona, za tri podserije stubova uvode neminovno u analizu i ovaj parametar.

Na kraju su opisani mehanizmi loma i proces deformacije i destrukcije ispitivanih modela. Istovremeno je analiziran odgovor sistema u odnosu na pojedine uticajne parametre koji su varirani u ovom eksperimentu.

2.3 KRATKA ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA EKSPERIMENTA

Ključni rezultati ispitivanja, tj. granična sila i maksimalni ugibi u pravcima glavnih centralnih osa inercije, prikazani su u tabeli 1, za svih 22 modela koji su tretirani kratkotrajnim teretom.

Za relativnu početnu ekscentričnost stubova $e/d=e/b=e/dk=0.2$ najmanja granična nosivost stubova se dobija kod slučajeva kosog savijanja, u svim ispitivanim slučajevima. Rezultati dobijeni na centrično pritisnutim stubovima za varirane vitkosti sa svim manifestacijama do loma ukazuje na slučaj gubitka stabilnosti I vrste. Iznenadni krti lom na sredini stuba uz jaki prasak istovremeno je indikator za dobro postavljen sistem i funkcionalnost aparature za ispitivanje, što nam obezbjeđuje reprezentativan uzorak za predmetnu analizu. Kod stubova sa nižim procentom armiranja, odnosno tanjim profilima, pri lomu dolazi do izbočavanja profila između susjednih uzengija i to u pravcu deformacije stuba.

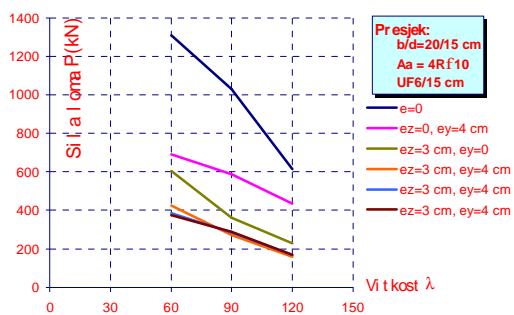
Pad nosivosti poprečnog presjeka AB stuba usled prirasta vitkosti ima teorijsku osnovu još od Euler-ovog doba. Rezultati ovog eksperimenta ukazuju da je ovaj uticaj, u slučaju koso savijanih stubova, relativno posmatrano, manje značajan nego, kod savijanja

stubova samo oko jedne od glavnih osa. Pri tome se, porastom vitkosti smanjuje ova razlika, tj. generalisana

Euler-ova kriva ima nešto sporiji pad kod stubova napregnutih kosim savijanjem (slika 13).

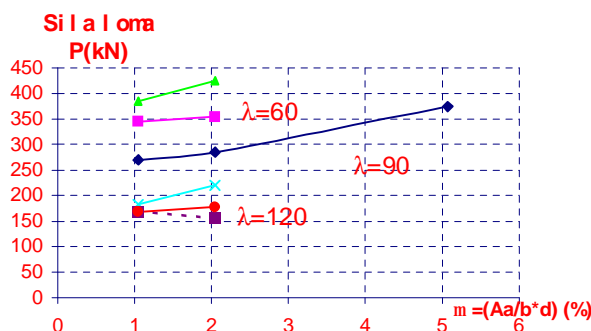
Tabela 1. Osnovne karakteristike ispitivanih modela i najvažniji rezultati testa

MODELI	oznaka stuba	ekscentričnost opterećenja	pod.arm. μ_a (%)	uzengije μ_u (%)	sila loma P (kN)	$\max U_y$ (cm)	$\max V_z$ (cm)	
SERIJA-A $\lambda=60$ $b/d=20/15\text{cm}$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0, \dots, 1)$	1	S 7	centrično	1.05	0.25	1310	0.49	0.20
	2	S 8	eksc. oko z ose	"	"	690	0.70	1.04
	3	S 9	eksc. oko y ose	"	"	603	0.12	1.55
	4	S 10	eksc. oko z i y	"	"	425	0.69	0.90
	5	S 11	"	2.05	"	385	0.96	1.50
	6	S 12	"	"	0.50	375	0.85	1.78
SERIJA-B $\lambda=90$ $b/d=20/15\text{cm}$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0, \dots, 1)$	7	S 13	centrično	1.05	0.25	1030	0.79	1.06
	8	S 14	eksc. oko z ose	"	"	590	0.20	2.48
	9	S 15	eksc. oko y ose	"	"	363	0.08	4.00
	10	S 16	eksc. oko z i y	2.05	0.50	290	1.38	2.68
	11	S 17	"	1.05	0.25	270	0.91	2.22
	12	S 18	"	2.05	"	285	1.52	3.70
	13	S 19	"	5.07	0.25	375	1.35	3.30
	14	S 20	"	"	0.50	385	1.49	4.12
SERIJA-C $\lambda=120$ $b/d=20/15\text{cm}$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0, \dots, 1)$	15	S 21	"	"	390	1.35	3.29	
	16	S 22	centrično	1.05	0.25	615	0.33	1.94
	17	S 23	eksc. oko z ose	"	"	435	2.99	0.60
	18	S 24	eksc. oko y ose	"	"	230	0.07	3.33
	19	S 25	eksc. oko z i y	2.05	"	220	1.82	3.36
	20	S 27	"	"	0.50	168	2.00	4.17
	21	S 28	"	1.05	0.25	160	1.62	2.74
	22	S 29	"	"	"	170	2.21	3.47



Slika 13. Pad nosivosti usled prirasta vitkosti dobijeni eksperimentom

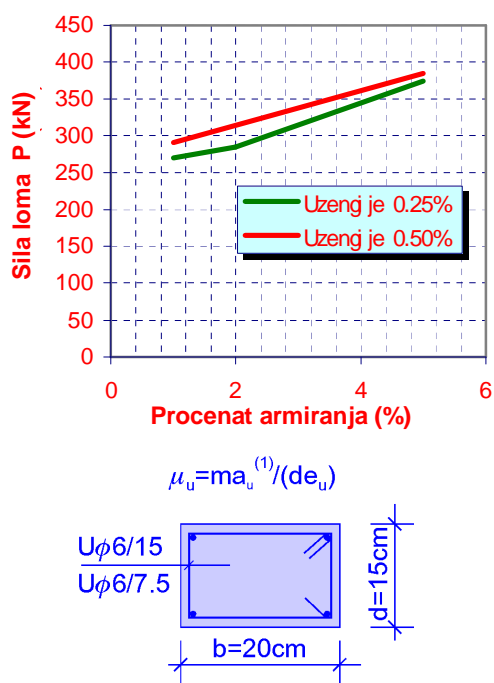
Uticao podužne armature za koso savijane vitke stubove ovdje je prikazan za reprezentativnu seriju B čija je vitkost $\lambda=90$ kod koje je ovaj parametar variran u tri veličine (slika 14). Evidentan je prirast nosivosti sa povećanjem procenta podužne armature i dobro se poklapa sa vrijednostima koje se dobijaju proračunom.



Slika 14. Prirast nosivosti usled povećanja podužne armature

Uticao poprečne armature je evidentan više kod formiranja mehanizma loma nego u doprinosu nosivosti poprečnog presjeka koso savijanog armiranobetonskog vitkog stuba (slika 15). Pri tome je od značaja imati uzengije na manjem rastojanju, dok im je veličina poprečnog presjeka u ispitivanim slučajevima bila indiferentna. Iako se iz ovog eksperimenta raspolože

malim brojem rezultata, utisak je da nema velikog efekta u pogledu prirasta nosivosti, "utezati" vitke stubove, ali je, sa stanovišta povećanja duktiliteta, korisno.



Slika 15. Prirast nosivosti usljed povećanja podužne i poprečne armature

2.4 UPOREDNA NUMERIČKA ANALIZA

Nakon eksperimentalnih ispitivanja, osnovni zadatak istraživača je upoređenje dobijenog odgovora eksperimentalnog modela sa rezultatima raspoloživih proračunskih metoda. Modeliranje metodom konačnih elemenata (MKE) omogućava da se, uz primjenu odgovarajućih programskih softvera, prikaže što je moguće realnije stanje testiranog modela. Treba napomenuti da je u ovom ispitivanju usvojeni model takvih dimenzija da se rezultati mogu direktno prenijeti na elemente prirodne veličine, tj. prototipove bez uvođenja korekcija prema zakonu sličnosti. Sve komponente betona i armature zadovoljavaju realne tehnički propisane uslove. Procenati podužne i poprečne armature (m_b , m_l), veličina maksimalnog zrna agregata ($maxd_i$), relativan odnos prečnika podužne i poprečne armature (f_a , f_u) u odnosu na dimenzije presjeka (b , d), veličina zaštitnog sloja (a_o) i sl. pripadaju realnim i uobičajenim granicama iz inženjerske prakse.

Za rješavanje ovog problema treba imati na umu geometrijske nelinearne promjene koje se manifestuju promjenom stanja napona i deformacija usled kontinuiranog prirasta bočnih deformacija (u -deformacija u pravcu jače strane, v -deformacija u pravcu slabije strane, w -rezultujuća prostorna deformacija). U oblasti graničnih stanja nosivosti treba takođe voditi računa o nelinearnom ponašanju armiranobetonskog presjeka, što je potrebno na odgovarajući način modelirati, vodeći računa o prisustvu horizontalne armature - uzengija kao i o pojavi prslina duž štapa. Univerzalni programski paketi za nelinearnu analizu, koji bi objedinili sve probleme

vezane za uticaje kratkotrajnog i dugotrajnog opterećenja armiranobetonskih konstrukcija ne postoje, a svaka uspješna primjena softvera umnogome zavisi od adekvatnih ulaznih parametara dobijenih iz dobro osmišljenog eksperimenta.

Rezultati računске analize, korišćenjem MKE, ukazuju na dobro poklapanje sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja ([9]).

2.5 UPOREDNA ANALIZA PRIMJENOM NEURONSKE MREŽE

Radi dimenzionisanja aparature za eksperimentalna istraživanja neophodno je utvrditi granične vrijednosti sila loma ispitivanih modela, koje se moraju aplicirati tako da se eksperiment sprovede bezbjedno. Istovremeno je sa stanovišta teorijskog pristupa važno prognozirati graničnu vrijednost opterećenja. Čini se da je u ovakvim slučajevima primjena ovakve jedne metode prognozno modela svrsishodna i može znatno olakšati pripremu ovakvih eksperimentalnih ispitivanja.

Izrada modela vještačke neuronske mreže koja je obučena za rješavanje ovog problema sastojala se u definisanju arhitekture mreže sa šest promjenljivih ulaza i to:

- vitkosti stubova I ,
- čvrstoće betona f_b ,
- ekcentriciteta u pravcu y ose e_y ,
- ekcentriciteta u pravcu z ose e_z ,
- procenta podužne armature m_b i
- procenta poprečne armature m_l .

Mreža ima tri izlaza i to:

- graničnu silu P_{ex} ,
- maksimalni ugib u pravcu y ose u_y i
- maksimalni ugib u pravcu z ose u_z .

Za trening mreže usvojena je troslojna neuronska mreža sa jednim skrivenim slojem i 20 neurona u skrivenom sloju.

Mreža je trenirana za slučaj kratkotrajnih opterećenja na skupu od 22 trening podataka.

Treniranje mreže je obavljeno na nerekurzivnoj mreži, dok je obučavanje mreže vršeno pomoću poboljšanog Backpropagation algoritma se periodičnim propuštanjem podataka iz trening skupa kroz neuronsku mrežu. Dobijene vrijednosti su upoređivane sa stvarnim izlazima i ukoliko se javila razlika vršila se korekcija težinskih koeficijenata. Korekcija težinskih koeficijenata mreže vršena je pravilom gradijentnog spusta:

$$w_{ij}^{(l)new} = w_{ij}^{(l)old} - h \frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}}$$

Kao aktivaciona funkcija korišćena je logistička sigmoidalna funkcija:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Poboljšanje Backpropagation algoritma je podrazumijevalo uvođenje momenta kako bi promjena težina u trenutku t zavisila od promjene u prethodnom trenutku:

$$Dw_{ij}^{(l)}(t) = -h \frac{\partial e_k}{\partial w_{ij}^{(l)}} + a Dw_{ij}^{(l)}(t-1), \quad 0 < a < 1.$$

Neuronska mreža koja je obučena prikazana je na slici 16.

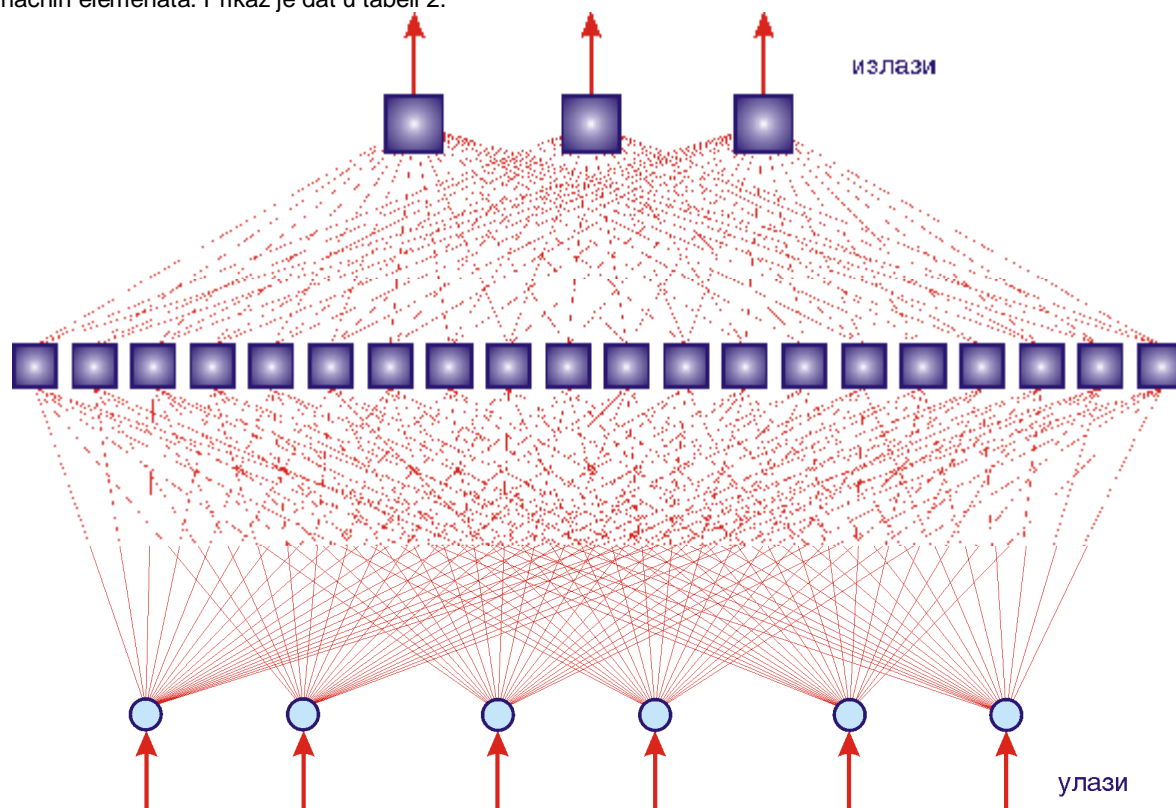
Prilikom obučavanja mreže biran je validacioni skup od 10 podataka. Obučavanje je u početku pokazivalo veliku divergenciju, da bi istrenirana mreža pokazala dobra prognozna svojstva.

Usporedni prikaz rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata i neuronskom mrežom za stvarno izmjerene podatke granične sile loma pokazuje da se podaci dobijeni neuronskom mrežom više približavaju stvarnim podacima, od podataka dobijenih metodom konačnih elemenata. Prikaz je dat u tabeli 2.

Neuronska mreža je trenirana u okviru MS Excel programa. Pokazuju se mala odstupanja od trening skupa. Na osnovu iniciranja mreže sa ulaznim podacima iz raspona veličina koje su korišćene pri eksperimentu, moguće je nacrtati prognozne modele zavisnosti izlaza od bilo kog ulaza.

Izgled trening i validacionog skupa nakon obuke je prikazan na slici 17:

Kao ilustracija primjene ove metode daje se dijagram za pad nosivosti usljed prirasta vitkosti, odnosno generalisana Euler-ova kriva (slika 18), gdje se uočava izvanredno dobro poklapanje prognoznog modela neuronske mreže sa rezultatima eksperimenta.

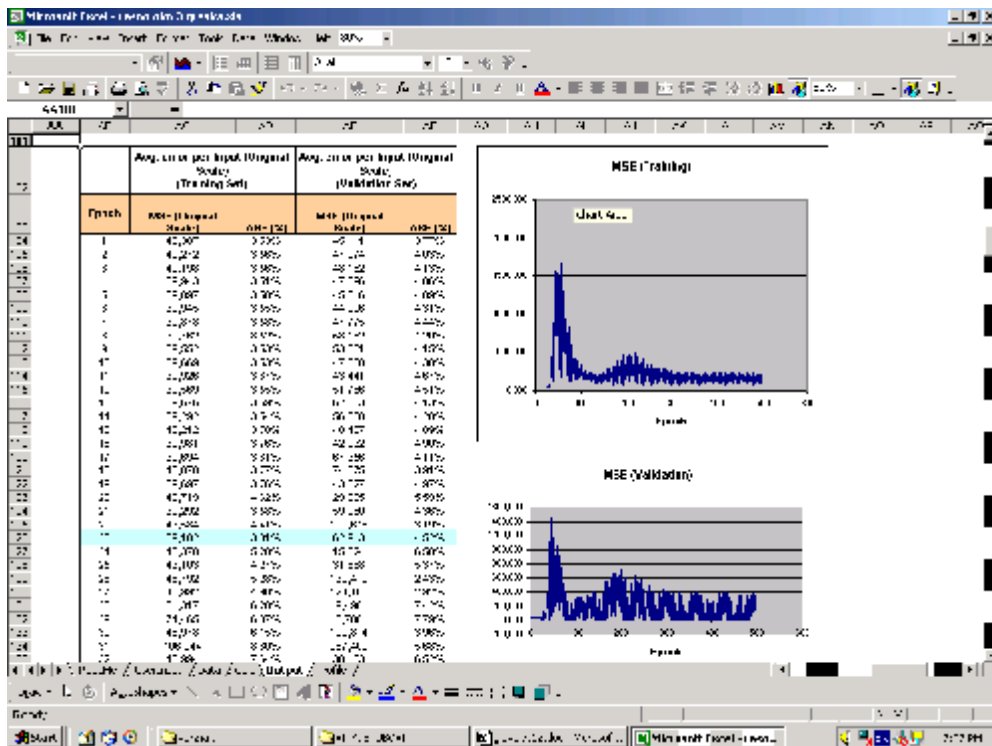


Slika 16. Neuronska mreža koja je korišćena za rješenje problema

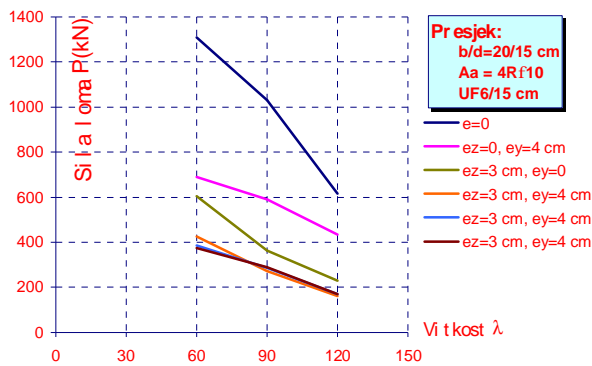
Tabela 2. Najvažniji rezultati testa i poređenje sa prognoznim modelima

MODELI	oznaka stuba	Izmjerena sila loma P (kN)	MKE prognoza sila loma P (kN)	NN prognoza sila loma P (kN)	Izmjereno $maxU_y$ (cm)	NN prognoza $maxU_y$ (cm)	Izmjereno $maxV_z$ (cm)	NN prognoza $maxV_z$ (cm)	
SERIJA-A I=60 $b/d=20/15cm$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0.; .1)$	1	S 7	1310	1035.30	1294.33	0.49	0.49	0.20	0.23
	2	S 8	690	564.10	688.53	0.70	0.70	1.04	1.05
	3	S 9	603	479.60	599.98	0.12	0.08	1.55	1.56
	4	S 10	425	304.20	421.95	0.69	0.71	0.90	0.91
	5	S 11	385	366.30	390.51	0.96	0.90	1.50	1.52
	6	S 12	375	366.30	361.26	0.85	0.91	1.78	1.73

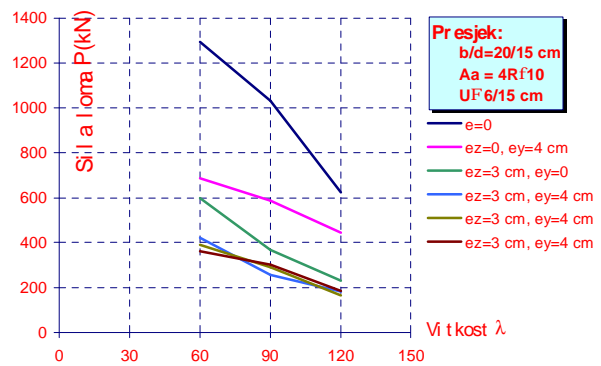
SERIJA-B I=90 $b/d=20/15\text{cm}$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0,; ,1)$	7	S 13	1030	831.50	1031.73	0.79	0.79	1.06	1.07
	8	S 14	590	543.20	587.86	0.20	0.22	2.48	2.49
	9	S 15	363	339.80	365.57	0.08	0.07	4.00	3.99
	10	S 16	290	247.20	301.03	1.38	1.36	2.68	2.75
	11	S 17	270	313.40	254.94	0.91	0.97	2.22	2.24
	12	S 18	285	313.40	288.93	1.52	1.53	3.70	3.60
	13	S 19	375	378.50	378.04	1.35	1.39	3.30	3.79
	14	S 20	385	378.50	381.32	1.49	1.44	4.12	3.78
	15	S 21	390	378.50	381.81	1.35	1.38	3.29	3.30
SERIJA-C I=120 $b/d=20/15\text{cm}$ $k=(e_y/b)/(e_z/d)=(0,; ,1)$	16	S 22	615	631.20	610.75	0.33	0.34	1.94	1.98
	17	S 23	435	428.30	433.71	2.99	2.95	0.60	0.61
	18	S 24	230	215.30	227.58	0.07	0.08	3.33	3.36
	19	S 25	220	210.20	187.71	1.82	1.87	3.36	3.38
	20	S 27	168	224.30	183.63	2.00	2.03	4.17	4.03
	21	S 28	160	224.30	178.66	1.62	1.63	2.74	2.82
	22	S 29	170	224.30	163.79	2.21	2.19	3.47	3.52



Slika 17. Trening i validacioni skup



a) eksperiment



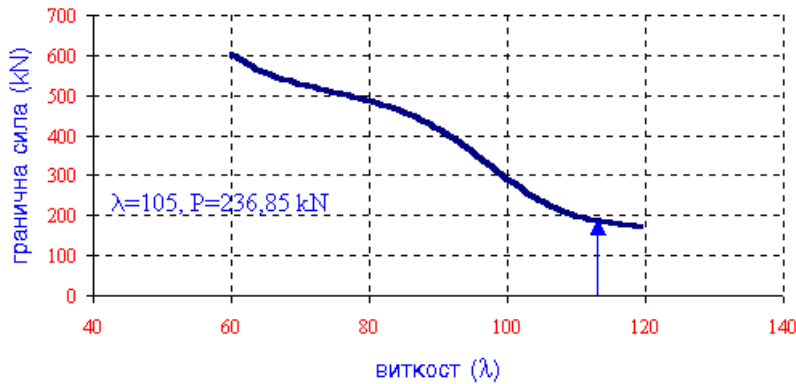
b) neuronska mreža

Slika 18. Pad nosivosti usled vitkosti – eksperiment-prognoza pomoću MKE i neuronske mreže

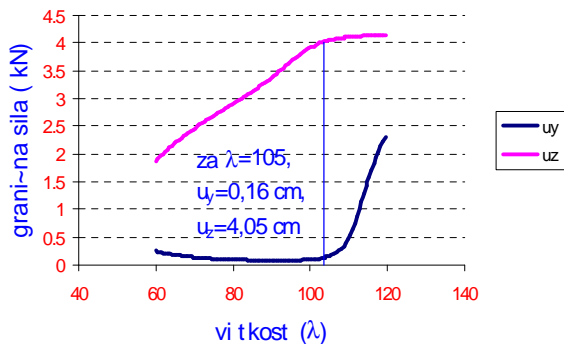
Projektovana i trenirana neuronska mreža može poslužiti za generalizaciju podataka za koje nijesu vršena eksperimentalna ispitivanja u granicama minimalnih i maksimalnih odstupanja ulaza. Na taj način za odabrani skup ulaznih podataka mogu se dobiti željeni izlazni podaci. Naprimjer za odabrane podatke: $l = 60-120$; $m_a = 3\%$; $m_u = 0.75\%$; $f_b = 35\text{MPa}$; $e_y = 2\text{cm}$; $e_z = 1\text{cm}$, prognozni model daje izlaze graničnu silu i maksimalne ugibe prema slikama 19 i 20,

za obostrano zglobno oslonjen prost štap od armiranog betona sa dimenzijama poprečnog presjeka $b/d = 20/15\text{cm}$. Pod istim uslovima dat je prognozni model promjene granične sile u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom (slika 21).

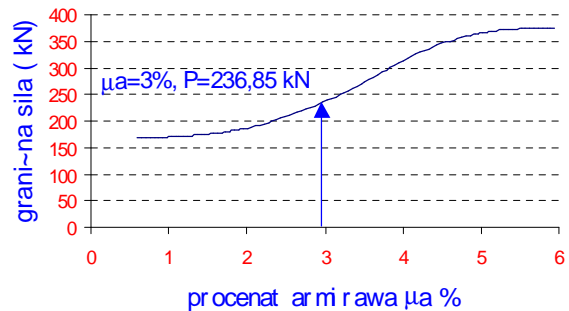
Kontrola prognoze je izvršena na tri probna uzorka sa kojim mreža nije trenirana. Greška prognoze je manja od 6%.



Slika 19. Prognozna sila za $l=60-120$; $m_a=3\%$; $m_u=0.75\%$; $f_b=35\text{MPa}$; $e_y=2\text{cm}$; $e_z=$



Slika 20. Prognozni ugibi u pravcu glavnih centralnih osa presjeka $b/d=20/15\text{cm}$, za $l=60-120$; $m_a=3\%$; $m_u=0.75\%$; $f_b=35\text{MPa}$; $e_y=2\text{cm}$; $e_z=1\text{cm}$,



Slika 21. Prognozna sila $b/d = 20/15\text{cm}$, za $l=105$; $m_a=(0,60 - 6.0)\%$; $m_u = 0.75\%$; $f_b = 35\text{MPa}$; $e_y = 2\text{cm}$; $e_z = 1\text{cm}$,

Tabela 3. Kontrola prognoznih rezultata u odnosu na karakteristike za koje mreža nije trenirana (probni modeli)

oznaka stuba	vitkost I	μ_{pod}	μ_{pop}	MB	e_y	e_z	izmjerena sila	pročitana sila
S_{01}	120	2.05	0.25	38	4	3	250	265.83
S_{02}	90	1.05	0.25	38	4	3	300	310.17
S_{03}	60	2.05	0.25	38	4	3	420	429.44

3 ZAKLJUČAK

Primjenom vještačke neuronske mreže moguće je sa velikom preciznošću prikazati zavisnosti promjenljivih ulaznih veličina i izlaznih veličina u slučajevima kada postoji dovoljan broj izmjerenih eksperimentalnih podataka. Naročito značaj ovih primjena je za sve slučajeve geometrijske nelinearnosti i uslova nehomogenosti materijala kakav je beton.

Neuronska mreža može modelovati nelinearna ponašanja materijala i generalizovati podatke za neizmjerene veličine izlaza.

4 LITERATURA

- [1] Van Horn D. Основы управления финансами: Пер. с англ., (под редакцией И. И. Елизеевой М.) Финансы и статистика, 1997, 800. str.
- [2] Project Management Body of Knowledge, Project Management Institute, Drexel Hill, 1987.
- [3] Werbos P. J. 1974. Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Masters thesis, Harvard University
- [4] Parker D. B. 1982. Learning logic. Invention Report S81-64, File 1, Office of Technology Licensing, Stanford University, Stanford, CA.
- [5] Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J. 1986. Learning internal representations by error propagation. In Parallel distributed processing, vol. 1, pp. 318-62. Cambridge, MA: MIT Press.
- [6] Knežević M., Upravljanje rijikom pri realizaciji građevinskih projekata, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.
- [7] Milenković S., Vještačke neuronske mreže, Zadužbina Andrejević, Beograd 1997.
- [8] Rumelhart D.E, Hinton G.E., Williams R.J., Learning Internal Representation by Error Propagation, Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition, Rumelhart D. E., McClelland J.L, Eds., vol I, pp. 318-362. MA: MIT Press, 1986.
- [9] Zejak R., Prilog analizi vitkih armiranobetonskih elemenata sa kosim savijawem, doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2003.
- [10] Baum E. B., Haussler D., What size Net Gives Valid Generalization?, Neural Computation, vol. 1, 1989
- [11] Leshno M., Lin V.Y., Pinkus A., Schocken S., Multilayer Feedforward Networks with a Nonpolynomial Activation Function Can Approximate any Function, Neural Networks, vol.6, 1993.
- [12] Hornik K., Stinchcombe M. White H., Universal Approximation of an Unknown Mapping and Its Derivatives Using Multilayer Feedforward networks, Neural Networks, vol.3, 1990.

REZIME

NEURONSKE MREŽE-PRIMJENA ZA IZRADU PROGNOZNOG MODELA EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA ZA VITKE ARMIRANO-BETONSKE STUBOVE

Miloš KNEŽEVIĆ
Radomir ZEJAK

Vještačkih neuronskih mreža i njihove primjene u izradi prognoznog modela rezultata eksperimentalnog istraživanja za vitke armirano betonske stubove.

Na primjeru naučnoistraživačkog projekta, koji pored ostalog sadrži i rezultate eksperimentalnih ispitivanja na 22 modela armiranobetonskih vitkih stubova, prikazana je primjena izrade prognoznog modela uz pomoć neuronske mreže.

Istraživanje je sprovedeno na Građevinskom fakultetu Univerziteta Crne Gore u Podgorici na vitkim armirano betonskim stubovima pri dejstvu kratkotrajnog opterećenja.

Primjena neuronske mreže u izradi prognoznog modela za graničnu silu i maksimalne ugibe u pravcima glavnih centralnih osa inercije u odnosu na variranih šest ulaznih parametara pokazuju zadovoljavajuće rezultate.

Nakon obučavanja neuronske mreže izvršeno je upoređenje rezultata prognoze za parametre granične sile, a takođe data prognoza za maksimalne ugibe u pravcima glavnih centralnih osa inercije.

Pokazuje se da neuronska mreža može modelovati nelinearna ponašanja materijala i generalizovati podatke za neizmjerene veličine izlaza.

SUMMARY

NEURAL NETWORKS-APPLICATION FOR USAGE OF PROGNOSTIC MODEL OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH FOR THIN REINFORCED-CONCRETE COLUMNS

Miloš KNEŽEVIĆ
Radomir ZEJAK

In the paper there is a presentation of the theory of artificial neural networks and their application in the construction of prognostic model of the result of experimental research for thin reinforced-concrete columns. On the example of research project, which beside others is composed of the results of experimental researches for 22 models of reinforced-concrete thin columns, the application of realization of the prognostic model was shown with the help of neural network. Investigation is hold at the Faculty of Civil Engineering in Podgorica with thin reinforced-concrete columns and during the effect of short-time load. Application of neural network in the construction of the prognostic model for the limit force and maximal flexion in the direction of main central axes of inertia show satisfied results in relation to the varying six input parameters. Comparison of the results of prognosis is realized after studying of neural network for parameters of the limit force, and also the prognosis for maximal flexions is given in the directions of main central axes of inertia.

It is shown that neural network can model non-linear behaviour of the material and generalize the data for immeasurable values of outputs.

UPUTSTVO AUTORIMA

Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljive radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvatit će se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava-primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Originalni naučni rad je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

Prethodno saopštenje sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez podrobnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

Pregledni rad je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni pregledni radovi.

Stručni rad predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođava-nja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

Konferencijsko saopštenje ili rad sopšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su sopštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

Sinopsis-opsežni sažetak (Extended abstract) predstavlja skraćen članak na dve strane font 10pt, koji će se štampati na engleskom jeziku za članke pisane na srpskom, a na srpskom jeziku za članke pisane na engleskom jeziku. U njemu se daje sažet opis predmeta i cilja rada, primenjenih metoda i postupaka istraživanja, prikazuju svi originalni rezultati potkrepljeni ilustracijama, kao i popis citirane literature. Objavljivanje Sinopsisa ne isključuje objavljivanje sažetka-rezimea od oko 150 reči uz tekst članka.

Ostali prilozi su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor. Recenzenti mogu, kada je to potrebno, direktno kontaktirati sa autorima, da bi se pre pisanja konačne recenzije otklonili eventualni nedostaci u radu. Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis slati, na adresu Redakcionog odbora, otkucan jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 25mm, u Wordu fontom Times New Roman sa 12pt (sa 60 slovnih znakova u redu i 35 redova po strani) i jednu kopiju svih

delova rada i priloga. Uz rukopis se predaje i elektronska kopija tekst fajlova, na disketi ako je sadržaj pretežno tekst, ili na CD-u ako ima više slika i grafičkih priloga. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-beloj tehnici, u formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-beloj tehnici, na kvalitetnoj hartiji sa ostrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabela daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom redu. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora navesti u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranica poglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu Redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: folic@uns.ns.ac.yu ili miram@uns.ns.ac.yu

