

Mostovi III – proračun životnog vijeka mostova – 2. dio

prof.dr.sc. Jure Radić, dipl.ing.građ.

dr.sc. Goran Puž, dipl.ing.građ.

dr.sc. Jelena Bleiziffer, dipl.ing.građ.



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Sadržaj

Sadržaj – 2. dio, praktična primjena:

1. Ponavljanje
2. Modeli dotrajavanja
3. Fizikalno – kemijski model prodora klorida
4. Regresijski model
5. Stohastički model
6. Zaključak

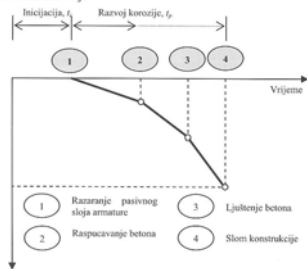


Mostovi III – proračun životnog vijeka

Ponavljanje

Analitičko predviđanje uporabnog vijeka konstrukcija osniva se na procesima degradacije materijala koji su podijeljeni na više stupnjeva s obzirom na razinu oštećenja u ovisnosti o vremenu.

Glavni mehanizmi razaranja armiranobetonskih konstrukcija ovise o penetraciji neke agresivne tvari iz okoliša u vanjski omotač betonskog elementa



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Modeli dotrajavanja

Matematički i fizikalni modeli dotrajavanja

matematički modeli - formiraju se na osnovi statističke obrade podataka o stanju velikog broja mostova, fizikalni modeli – zasnovani na poznavanju fizikalnih i kemijskih pojava koje uzrokuju dotrajavanje građevine.

Razvojne faze modeliranja dotrajavanja

Stariji modeli - ocjenjivali su preostali životni vijek, odnosno razdoblje nakon kojeg most dolazi u stanje u kojemu više ne može vršiti svoju funkciju

Noviji modeli: razrađuju se tako da prepoznaju specifične faze u procesu dotrajavanja i omogućuje planiranje radova na održavanju.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Modeli dotrajavanja

Pristup zasnovan na fizikalnom modeliranju procesa

Za mostove ugrožene penetracijom klorida iz okoliša računa se vrijeme potrebno da kritična razina agensa dosegne razinu armature.

Kada je korozija započela računa se vrijeme potrebno da proces uništi određeni postotak volumena armaturne šipke ili vrijeme do odlamanja zaštitnog sloja betona.

Provedena istraživanja i uspostavljeni modeli omogućuju formulaciju racionalnog modela proračuna trajnosti armiranobetonskih konstrukcija koje su već oštećene tijekom eksploatacije

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Modeli dotrajavanja

Statistički pristup

Ukoliko postoje podaci o stanju velikog broja mostova različite starosti, statističkim metodama može se tražiti veza između starosti i stanja, a iz ovih veza mogu se konstruirati funkcijske zakonitosti koje opisuju proces dotrajavanja.

Na statističkoj obradi podataka možemo zasnovati

- deterministički pristup
- probabilistički pristup

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Fizikalno – kemijski model prodora klorida

Razaranja betona najčešće su kombinacija više čimbenika, što otežava razradu proračunskih modela dotrajavanja konstrukcija.

U slučajevima mostova u primorskom okolišu dominantni uzrok oštećenja je penetracija klorida, koji kao katalizator, uz prisutnost vlage i kisika tvore uvjete za koroziju armature.

razdoblje uvođenja ili inicijacije: nema korozije armature, ali raste koncentracija slobodnih iona klorida u zaštitnom sloju betona, što je posljedica različitih transportnih mehanizama

razdoblje napredovanja ili propagacije: aktivna korozija do dosizanja graničnog stanja

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Matematički model

Difuzija u anizotropnim, nehomogenim materijalima (armirani beton), kada se koncentracija mijenja s vremenom (nestacionarno stanje difuzije) modelira se pomoću drugog Fickovog zakona.

Stupanj prodiranja kloridnih iona u beton ovisi o koncentraciji klorida u površinskom sloju, klimatskim uvjetima (vlažnost i temperatura) i svojstvima samog betona.

Proces uvođenja klorida kroz površinu betona modelira se nestacionarnom difuzijom u polubeskonačni medij.

Taj proces opisan je parcijalnom diferencijalnom jednačinom za funkciju

$$C = C(x, t)$$

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Gdje je:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{promjena koncentracije u vremenu}$$

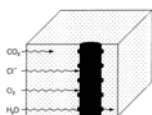
$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{promjena koncentracije po presjeku, odnosno;}$$

C koncentracija klorida u težinskim postocima betona

t vrijeme (godine)

D koeficijent difuzije betona zaštitnog sloja ($\text{mm}^2/\text{godinu}$)

x dubina prodiranja (mm)



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Brzina penetracije klorida u beton ovisi o njegovoj propusnosti - koeficijentu difuzije.

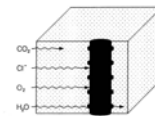
Rješenje jednačine koje se najčešće koristi ima oblik:

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} t}} \right) \right]$$

gdje je:

$C(x, t)$ koncentracija klorida u vremenu t na dubini x u težinskim postocima betona (%)

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad \text{funkcija pogreške}$$



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

C_s koncentracija klorida na površini betona (u % na težinu betona)

D_{Cl} koeficijent difuzije kloridnih iona u beton (cm^2/s)

Rezultati nekih istraživanja pokazali su da drugi Fickov zakon difuzije ne daje uvijek objektivnu sliku transporta klorida u betonu. Dva su glavna razloga za to:

- beton nije homogen materijal
- značajke betona mijenjaju se s vremenom.

Ovi faktori mogu se uzeti u obzir na taj način da se parametri u formulama izvedenim iz osnovnog zakona promatraju kao varijable ovisne o vremenu

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Približna formula

Promjena koncentracije klorida po dubini betona može se aproksimirati parabolom koja ispunjava uvjete drugog Fickova zakona difuzije

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \frac{x^2}{2\sqrt{3} D_{Cl} t} \right]^2$$

U većini propisa dana je kritična koncentracija ukupnih klorida na dubini armature u iznosu od 0,4% kloridnih iona na masu cementa za armirani beton, odnosno 0,2% za prednapeti beton.

Koeficijenti difuzije kloridnih iona na betonima u Hrvatskoj određeni su eksperimentalno.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Fizikalno – kemijski model korozije armature

Kada je dosegnuta granična vrijednost koncentracije klorida na razini armature može se reći da je dovršena faza inicijacije i da počinje faza aktivne korozije.

Korozija se može pojaviti po čitavoj površini ugroženih šipki armature (opća korozija) ili vrlo lokalizirano, na pojedinačnim mjestima (točkasta korozija). Ako je proces uzrokovan kloridima, obično se javlja lokalizirana korozija.

Korozija armature u betonu je elektrokemijski proces, koji uključuje premještanje iona između katodnih i anodnih područja na površini čelika kroz elektrolit

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Modeliranje korozije

Za proračun brzine korozije postoji niz matematičkih modela i empirijskih izraza, a najčešće se koristi:

$$\Phi(t) = \Phi_i - 0,023 \cdot i_{corr} \cdot t$$

gdje je:

$\Phi(t)$ veličina promjera armaturene šipke u trenutku t (mm)

Φ_i početna veličina promjera armaturene šipke (u trenutku $t=0$ (mm))

i_{corr} gustoća korozijske struje ($\mu A/cm^2$)

0,023 faktor konverzije iz ($\mu A/cm^2$) u (mm/god).

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Model korozije

Veličina gustoće korozijske struje, u nedostatku mjerenih veličina, može se pretpostaviti temeljem eksperimentalnih podataka. Za različite uvjete vlažnosti okoliša gustoća varira od vrijednosti manjih od $0,1 \mu A/cm^2$ do $10 \mu A/cm^2$

-formula za računanje vremena za koje se polumjer šipke smanji za kritični iznos

$$t_1 = \frac{\Delta\Phi_i}{0,023 p i_{corr}}$$

$\Delta\Phi_i$ granični gubitak promjera armaturene šipke (mm)
 p koeficijent povećanja gustoće korozijske struje

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Fizikalno – kemijski model

Model korozije

Podaci o klimatskim okolnostima i parametrima gradiva koji su potrebni za ovakve proračune tipični su za različita podneblja i razne vrste sastojaka betona. Sustavnim prikupljanjem ovih podataka smanjuje se količina uzoraka koje treba pribaviti i pokusa koje treba načiniti in situ.

No, i uz najopsežnija ispitivanja i razvijene modele, kod određivanja vremena uvođenja i napredovanja korozijskog procesa do unaprijed određenog graničnog stanja, još je prisutna velika nesigurnost.

To znači da izračunate veličine možemo promatrati kao slučajne varijable, odnosno, opravdano je čitav proces promatrati **stohastički**.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

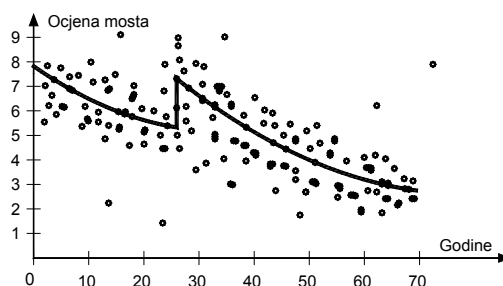
Regresijski model

Postupci razrađeni u SAD zasnovani su na statističkoj obradi podataka iz Nacionalnog registra mostova (NBI), koji obuhvaća 643 399 građevina.

- promatrane ocjene općeg stanja,
 - ljestvica raspona 0 do 9
 - ocjenjivanje svake dvije godine
 - promatran niz rezultata kroz desetogodišnje ili dulje razdoblje
- Izdvojene su skupine mostova sličnih značajki, da bi na njima bila istražena veza starosti s ocjenom općeg stanja.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Regresijski model


Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Modeli kreirani u SAD

Izvedeni su modeli ovisnosti starosti mosta i ocjene stanja za:

- mostove od različitih gradiva
(čelik, beton, prednapeti beton)
- različite tipove konstrukcija
- pojedine elemente mosta
(kolnička ploča, gornji ustroj, donji ustroj)
- mostove s različitim vlasnicima
(državni, lokalni gradski)
- mostove s različitim prometnim opterećenjem

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Matematički aparat za regresijski model

Za rješavanje navedenog problema primjenjen je jednodimenzionalni regresijski model u kojem je vrijeme t neslužajna varijabla, a ocjena stanja građevine S slučajna varijabla.

U tom se modelu pretpostavlja oblik regresijske funkcije μ (određene konačnim brojem parametara) i razvija algoritam za određivanje tih parametara na temelju statističkih podataka, tj. na temelju niza od n sparenih mjerenja veličina t i S .

Na temelju regresijske funkcije dobiva se tzv. regresijska krivulja (graf regresijske funkcije) koja zorno prikazuje "trend" tj. grubu vremensku ovisnost promatrane pojave.

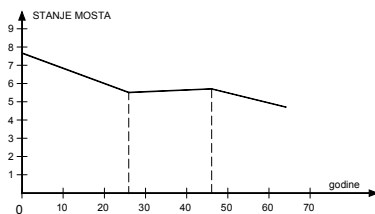
Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Statistička obrada – regresijski model

karakteristične faze životnog vijeka mosta:

- strmi pad tijekom prvih 20 do 25 godina
- približno horizontalan ili lagano penjući: 25 - 45 godina
- blaži pad između 45 i 60 godina.



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Pojašnjenje:

- Tijekom prvih 25 godina aktiviraju se sakriveni nedostaci unutar dijelova sklopa, (slabosti projekta i izvedbe)
- 25 do 30 godina: prvi veći popravci koji - blago povećanje prosječne ocjene koja se stabilizira uz redovite popravke i održavanje. Dugotrajni procesi dotrajavanja uzrokuju latentna oštećenja, koja se kod ocjenjivanja ne registriraju.
- Kod mostova starijih od 45 godina primjetno je da su projektirani prema nižim standardima (propisi za opterećenja, propisi koji reguliraju konstruiranje nosivih elemenata), pa su na njima uočena relativno veća oštećenja.
- Mostovi stariji od 60 godina ne čine mjerodavan uzorak.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Regresijski model

Precizniji opis procesa dotrajavanja mostova može se dobiti pomoću određenog nelinearnog regresijskog modela.

Za regresijsku funkciju odabrana je eksponencijalna funkcija. Unutar modela predviđeno je i poboljšanje stanja (skokovit prirast), do kojeg dolazi pri vršenju popravaka.

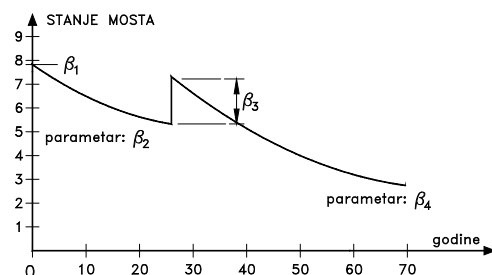
Osnovni model, s četiri parametra, predviđa jedan popravak, odnosno unaprijeđenje stanja tijekom životnog vijeka.

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Regresijski model

Određuju ga: funkcija i parametri.



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Regresijski model

Regresijska funkcija

- $\mu(t)$ - očekivano stanje građevine u trenutku t (0 do 9)
 e - baza prirodnog logaritma
 t - starost mosta u godinama
 t_r - starost mosta u trenutku popravka
 β_1 - vrijednost regresijske funkcije u trenutku $t=0$
 β_2 i β_4 - koeficijenti dotrajavanja
 β_3 - koeficijent koji definira poboljšanje stanja prigodom popravka

$$\mu(t) = \begin{cases} \beta_1 e^{\frac{t}{\beta_2}}, & \text{za } 0 \leq t < t_r \\ \left(\beta_1 e^{\frac{t}{\beta_2} + \beta_3} \right) e^{\frac{(t-t_r)}{\beta_4}}, & \text{za } t \geq t_r \end{cases}$$

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Stohastički model zasnovan na teoriji Markovljevih lanaca

Pomoću Markovljevog lanca računa se vjerojatnost da se most ili element mosta u određenom trenutku nađe u određenom stupnju dotrajalosti.

Broj stanja (stupnjeva dotrajalosti) u kojima se Markovljev proces može naći je konačan.

Grubo rečeno, Markovljevo svojstvo glasi:

Stanje procesa u budućnosti ovisi isključivo o sadašnjem stanju procesa, a ne i o stanjima u prošlosti.

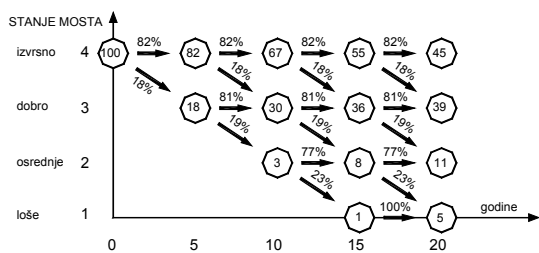
Za određivanje vjerojatnosti da se proces u nekom diskretnom trenutku vremena t_n nađe u stanju S , potrebno je poznavati početne vjerojatnosti stanja i prijelazne vjerojatnosti

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Markovljevi lanci

- Model razrađen na osnovi statističke obrade podataka
- Ključno: vjerojatnost promjene stupnja dotrajalosti tijekom vremena
- u Sustavu gospodarenja mostovima SAD, Kanade, Finske...

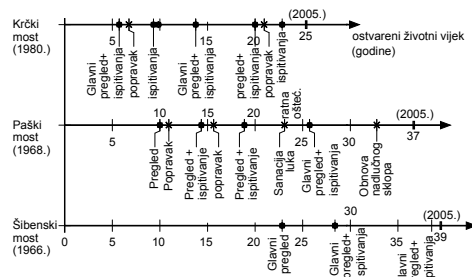


Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Markovljevi lanci

Problem: nedostatak podataka prikupljenih na sustavan način u određenim intervalima



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Markovljevi procesi

Teorija homogenih Markovljevih procesa s konačnim skupom stanja i kontinuiranim parametrom: opisivanje fizičke stvarnosti gdje se promjene tijekom vremena odvijaju na slučajan način

Most: sustav sastavljen od karakterističnih dijelova kojima se svojstva mijenjaju tijekom vremena.

Karakteristična razdoblja u životnom vijeku mosta - stupnjevi dotrajalosti.

Pretpostavka:

parametar koji karakterizira stanje tijekom vremena poprima diskretne vrijednosti (stupnjeve dotrajalosti) prema vjerojatnosnim zakonitostima

Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Markovljevi procesi

Pretpostavka: poznate su (opažene, izmjerene ili procijenjene) određene veličine (parametri) koje zahtijeva teorijski model

Matematičkim putem izvode se tražene veličine, odnosno vjerojatnosti stanja građevine, npr.



Izvode se egzaktna formula koja omogućuju izračunavanje vjerojatnosti stanja objekta u svakom trenutku, a zatim i druge relevantne parametre za ocjenu stupnja dotrajalosti.

Markovljevi procesi

Temeljna formula teorije homogenog Markovljevog procesa u kojem postoji r mogućih stanja glasi:

$$p_j(t) = \sum_{i=1}^r p_i(0) p_{ij}(t), \quad j = 1, 2, \dots, r$$

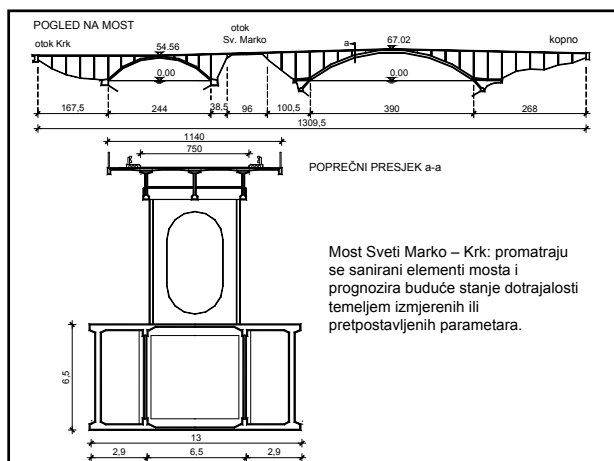
gdje je:

$p_j(t)$ - vjerojatnost da se proces u trenutku t nađe u stanju j .

$p_i = p_i(0)$ - vjerojatnost da proces počinje ($t=0$) iz i - tog stanja (broj)

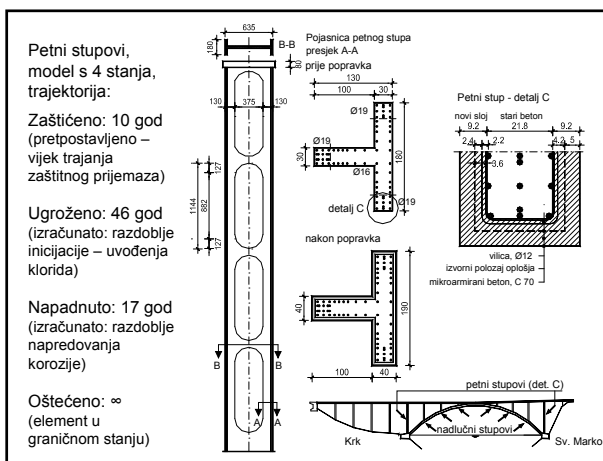
$p_{ij}(t)$ ($i \neq j$) - vjerojatnost da proces prijeđe iz stanja i u stanje j kroz vrijeme t (*funkcija*)

$p_{ii}(t)$ - vjerojatnost ostanka u stanju i tijekom vremena t
(funkcija)



Most Sveti Marko – Krk: promatraju se sanirani elementi mosta i prognozira buduće stanje dotrajalosti temeljem izmjerenih ili pretpostavljenih parametara.

Markovljev proces – primjer Krčkog mosta



Grafički prikaz vjerojatnosti stupnjeva dotrajalogosti za popravljivi petni stup

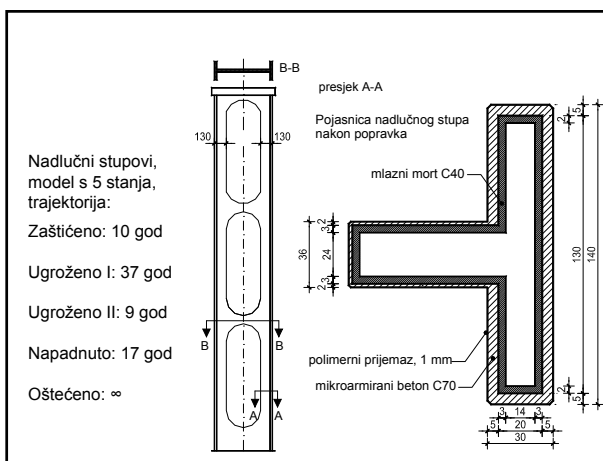
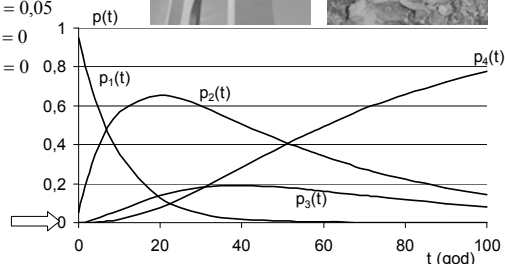
Početne vjerojatnosti:

$$p_1 = p_1(0) = 0,95$$

$$p_2 = p_2(0) = 0,05$$

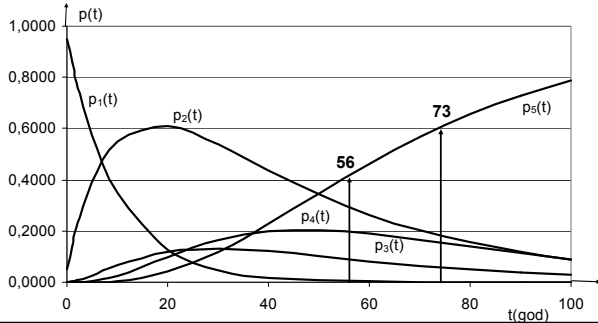
$$p_3 = p_3(0) = 0$$

$$p_4 = p_4(0) = 0 \quad 0$$



Nadlučni stupovi, model s 5 stanja, analiza:

- deterministički: aktivna korozija (stanje 4) počinje nakon 56 godina
- model: stanje 4 nikada nije najvjerojatnije, nakon 56 godina najvjerojatnije je stanje 5 (oštećeno)



Mostovi III – proračun životnog vijeka

Stohastički model

Zaključak

Razrađen je veći broj modela dotrajanja mostova.

Odrednice za razradu ili odabir modela:

1. fizikalno-kemijski modeli predstavljaju najprikladnije oruđe za predviđanje vremena trajanja faza procesa.
2. sam proces dotrajanja ima slučajnu prirodu pa ga treba promatrati kao stohastički proces*.

(*matematička apstrakcija stvarnog procesa koji se odvija po vjerojatnosnim zakonima)

3. modeli koji uključuju statističku obradu zahtijevaju veliku količinu konzistentnih podataka



Hvala na pažnji.