

DETERMINISTIČKI I PROBABILISTIČKI PRISTUP U INŽENJERSKOM MODELIRANJU / DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC APPROACH IN ENGINEERING MODELING

Zlatica Kuliš¹, Amar Hrustanović¹

¹Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja
konzula –Meljanac bb 72270 Travnik, Bosna i Hercegovina
e-mail: zlatica.kulis@iu-travnik.com, amar.hrustanovic7@gmail.com

Stručni članak

<https://www.doi.org/10.58952/zr20261501420>

UDK/UDC 62:519.2:519.8

Sažetak

U suvremenom inženjerstvu, donošenje odluka o sigurnosti i trajnosti konstrukcija predstavlja izazov koji zahtijeva duboko razumijevanje prirode materijala i opterećenja. Inženjerska praksa se kroz povijest oslanjala na čvrsta pravila i jasno definirane parametre, što nazivamo determinističkim pristupom. Međutim, rad na velikim infrastrukturnim projektima, kao što je izgradnja autoputa, svakodnevno nas podsjeća da su varijacije neizbježne. Ni jedan kubik betona nije potpuno identičan prethodnom, niti je tlo ispod trase autoputa uniformno na svakom metru. Upravo te varijacije nameću potrebu za probabilističkim pristupom, koji ne promatra svijet kao skup fiksnih brojeva, već kao skup vjerojatnoća. Cilj ovog rada je da analizira oba pristupa, istražujući kako se tradicionalne metode dopunjuju modernim statističkim modelima u svrhu optimizacije troškova i povećanja sigurnosti učesnika u saobraćaju. Razumijevanje ove razlike ključno je za svakog inženjera, jer se upravo u tom prostoru između teorijske sigurnosti i stvarne vjerojatnoće otkaza donose najvažnije inženjerske odluke.

Ključne riječi: trajnost, deterministički pristup, probabilistički pristup, vjerojatnoća, sigurnost
JEL klasifikacija rada: L7

Abstract

In modern engineering, making decisions about the safety and durability of structures is a challenge that requires a deep understanding of the nature of materials and loads. Engineering practice has historically relied on firm rules and clearly defined parameters, which we call a deterministic approach. However, working on large infrastructure projects, such as highway construction, reminds us daily that variation is inevitable. Not a single cubic meter of concrete is completely identical to the previous one, nor is the soil beneath the highway route uniform on every meter. It is these variations that impose the need for a probabilistic approach, which does not view the world as a set of fixed numbers, but as a set of probabilities. The aim of this paper is to analyze both approaches, investigating how traditional methods are complemented by modern statistical models in order to optimize costs and increase the safety of road users. Understanding this difference is crucial for every engineer, because it is in this space between theoretical safety and the actual probability of failure that the most important engineering decisions are made.

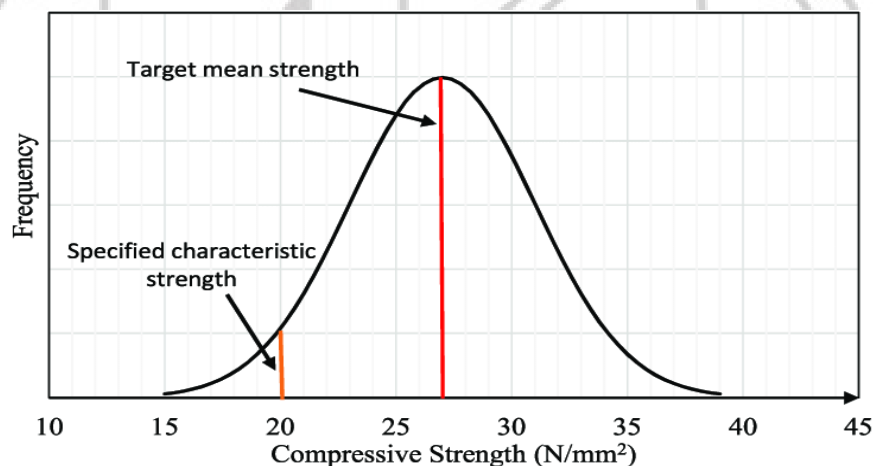
Keywords: durability, deterministic approach, probabilistic approach, probability, safety
JEL work classification: L7

1. DETERMINISTIČKI MODELI: TRADICIJA I SIGURNOST

Deterministički pristup polazi od pretpostavke da su svi parametri koji utiču na konstrukciju unaprijed određeni i poznati. U ovom modelu, inženjer koristi nominalne vrijednosti za čvrstoću materijala, dimenzije elemenata i intenzitet saobraćajnog opterećenja. Osnovni princip na kojem počiva ova metoda jeste da će konstrukcija biti sigurna ako je njena otpornost veća od utjecaja koji na nju djeluju, uz primjenu određenog koeficijenta sigurnosti.

1.1. UPOTREBA KOEFICIJENATA SIGURNOSTI U NISKOGRADNJI

U praksi izgradnje autoputeva, ovaj pristup se najviše očituje kroz standardne proračune kolovoznih konstrukcija ili potpornih zidova. Kada projektiramo most na dionici autoputa, mi koristimo propisane vrijednosti opterećenja koje su definirane normama. Sigurnost se postiže uvođenjem globalnog koeficijenta sigurnosti koji služi kao "tampon zona" za sve ono što nismo mogli precizno izmjeriti. Na primjer, ako proračun kaže da tlo može izdržati određeni pritisak, mi ćemo projektirati temelj tako da on bude znatno jači, vjerujući da će taj višak pokriti eventualne greške u izvođenju ili lošija kvaliteta materijala. Ova slika prikazuje kako se čvrstoća betona rasipa oko prosjeka. Pomaže u objašnjavanju zašto jedan uzorak nije dovoljan za ocjenu kvalitete cijele dionice autoputa.



Slika 1. Gaussova kriva (Normalna raspodjela)

1.2. OGRANIČENJA DETERMINISTIČKOG RAZMIŠLJANJA NA TERENU

Iako je ovaj metod jednostavan i pruža osjećaj sigurnosti, on ima svoje mane, naročito u kompleksnim uslovima rada. Problem nastaje jer deterministički model tretira nesigurnost na "grub" način. On ne pravi razliku između materijala koji ima strogu kontrolu kvaliteta u fabrici i prirodnog materijala na terenu čija svojstva variraju. Na gradilištu autoputa često se susrećemo sa situacijom gdje se geološki profil mijenja svakih deset metara.

Deterministički pristup nas prisiljava da uzememo najlošiju vrijednost i primijenimo je na cijelu dionicu, što često vodi ka predimenzioniranju konstrukcije i nepotrebnom trošenju resursa, ili u gorem slučaju, ka previdu ako se pojavi ekstremna vrijednost koja je izvan predviđenog opsega.

2. PROBABILISTIČKI PRISTUP I UPRAVLJANJE RIZIKOM

Za razliku od prethodnog, probabilistički pristup prihvata realnost da su inženjerski parametri promjenljive (slučajne) veličine. Umjesto jednog broja, ovdje baratamo sa raspodjelama vjerovatnoće. Ovaj pristup ne pita "koliki je faktor sigurnosti?", već "kolika je vjerovatnoća da će doći do prekoračenja dozvoljenog napona?".

2.1. STATISTIČKA PRIRODA INŽENJERSKIH MATERIJALA

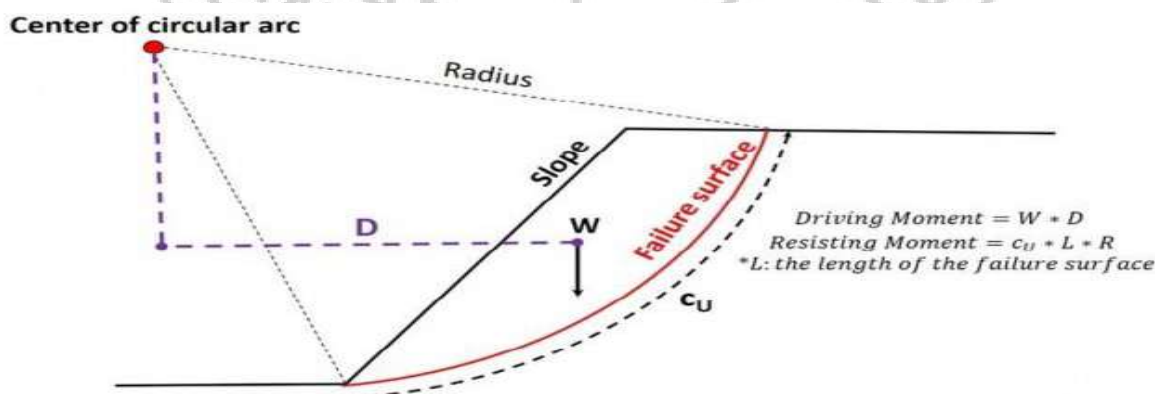
Kada radimo na izgradnji autoputa, svakodnevno uzimamo uzorke materijala. Ako testiramo 100 kocki betona namijenjenih za objekte na autoputu, rezultati njihove čvrstoće će formirati Gaussovu krivu (normalnu raspodjelu). Većina uzoraka će biti oko tražene klase, ali će određeni broj biti iznad ili ispod prosjeka. Probabilistički pristup koristi ove podatke da bi izračunao rizik. U inženjerskom modeliranju, ovo nam omogućava da predvidimo ponašanje cijelog sistema tokom vremena, uzimajući u obzir zamor materijala i varijabilnost saobraćajnog opterećenja tokom eksploatacije autoputa.

2.2. POUZDANOST SISTEMA I INTERAKCIJA OPTEREĆENJA

Jedna od ključnih prednosti ovog pristupa u radu je koncept "indeksa pouzdanosti". On nam pomaže da razumijemo interakciju između dvije raspodjele: raspodjele otpornosti konstrukcije i raspodjele opterećenja. Na dionici autoputa, opterećenje nije samo težina vozila, već i uticaj vjetera, temperaturnih promjena i slijeganja tla. Probabilistički modeli nam dozvoljavaju da sve ove faktore promatramo istovremeno kao skup vjerovatnoća. Na taj način, umjesto nagađanja, mi dobivamo matematički model koji kaže da je vjerovatnoća pojave pukotina na određenoj dionici u narednih 20 godina npr. manja od 1%. To omogućava investitoru i izvođaču da bolje planiraju održavanje i sredstva ¹⁶⁴. Prikazuje zonu u kojoj se susreću ekstremno veliko opterećenje i slaba otpornost materijala (zona rizika).

3. SPECIFIČNOSTI PRIMJENE NA IZGRADNJI AUTOPUTA

Rad na velikim infrastrukturnim projektima, kakav je autoput, predstavlja idealno polje za testiranje granica između determinističkog i probabilističkog modeliranja. Kao inženjeri na terenu, svakodnevno svjedočimo činjenici da projekti u uredu (deterministički) često moraju biti korigirani pod uticajem varijabilnosti realnog svijeta (probabilistički). Ovo je klasičan inženjerski prikaz klizne plohe na nasipu ili usjeku. Odlično se uklapa uz tvoj osvrt na radove na terenu.



Slika 2. Stabilnost kosine

¹⁶⁴ Agencija za autoputeve (Interni dokumenti), Analiza varijabilnosti čvrstoće betona na dionici Koridora Vc,

3.1. KONTROLA KVALITETA MATERIJALA (ASFALT I BETON)

U determinističkom pristupu, mi kažemo: "Beton za ovaj most mora biti klase C30/37". To je fiksna točka. Međutim, u praksi, svaka miješalica koja dođe na gradilište ima blago različitu čvrstoću. Kada radimo na trasi, koristimo statističke metode za prijem materijala. Ako analiziramo rezultate kidanja kocki betona tokom tri mjeseca rada na dionici autoputa, vidjet ćemo da čvrstoća varira u obliku zvona (Normalna raspodjela). Probabilistički pristup nam omogućava da izračunamo kolika je vjerovatnoća da će se pojaviti uzorak čvrstoće niže od projektirane, što je ključni parametar pouzdanosti. Na taj način, inženjer na gradilištu ne donosi odluku samo na osnovu jednog lošeg uzorka, već na osnovu trenda i vjerovatnoće pojave defekta u cijeloj seriji.¹⁶⁵

3.2. GEOTEHNIČKI RIZICI I STABILNOST KOSINA NA TRASI

Možda najizraženiji primjer razlike ova dva pristupa vidimo kod proračuna stabilnosti visokih zasjeka na autoputu. Deterministička analiza (metoda graničnih stanja) nam daje jedan broj, npr. faktor sigurnosti 1.35. Taj broj nam ulijeva povjerenje, ali on ne uzima u obzir "skrivenne" faktore poput nehomogenosti tla ili nepredviđenog rasta nivoa podzemnih voda uslijed obilnih padavina. Uvođenjem probabilističke analize (npr. Monte Carlo simulacija), možemo simulirati hiljade različitih scenarija u kojima se parametri trenja i kohezije tla mijenjaju unutar realnih granica. Rezultat takve analize na našem gradilištu nije jedan broj, već procenat koji kaže: "Postoji 2% šanse da će doći do odrona pri ekstremnim padavinama". Ovakav podatak je mnogo korisniji za nas na terenu jer nam omogućava da ciljano pojačamo kritične tačke, umjesto da neracionalno trošimo beton i sidra na cijeloj dionici.

3.3. POLU-PROBABILISTIČKI PRISTUP (PARCIJALNI KOEFICIJENTI)

Suvremena inženjerska praksa u Bosni i Hercegovini i regionu se sve više oslanja na Eurokod (EN) standarde. Ovi standardi su zapravo hibrid između dva pristupa o kojima govorimo. Oni koriste tzv. "polu-probabilistički metod". Umjesto jednog globalnog koeficijenta sigurnosti, Eurokod uvodi parcijalne koeficijente za materijale. Ovo je pokušaj da se deterministička jednostavnost spoji sa probabilističkom preciznošću. Na primjer:

- Opterećenje od vjetra na portale saobraćajne signalizacije na autoputu množi se većim koeficijentom jer je ono varijabilnije.
- Težina samog asfalta se množi manjim koeficijentom jer je ona stalna i lakše predvidiva. Ovim se postiže da se nesigurnost tretira tamo gdje je ona stvarno prisutna, što je suština učenja o pouzdanosti sistema.

3.4. EKONOMSKI UTICAJ INŽENJERSKOG PRISTUPA

Jedno od najvažnijih pitanja na master studiju je i ekonomija građenja. Deterministički pristup je često "siguran, ali skup". Ako projektiramo svaki stub mosta na autoputu kao da je najslabiji ikad proizveden, troškovi materijala bi bili ogromni. Probabilistički pristup omogućava optimizaciju. Na dionicama autoputa gdje su rizici po ljudske živote manji (npr. zaštitne ograde u ravnici u odnosu na stubove vijadukta), možemo prihvatiti nešto veći stepen vjerovatnoće rizika kako bismo uštedjeli milione KM, a da pritom sistem ostane unutar granica prihvatljive sigurnosti.

¹⁶⁵ Institut za standardizaciju BiH, BAS EN 1990: Eurokod - Osnove projektovanja konstrukcija, Sarajevo, 2014.

4. MATEMATIČKO-STATISTIČKI MODELI POUZDANOSTI

Da bismo prešli sa teorijskog razmišljanja na konkretne inženjerske brojke, moramo koristiti matematičke modele koji opisuju ponašanje konstrukcije na autoputu. U probabilističkom pristupu, ključna je funkcija granice stanja, koja definiše granicu između sigurnog rada i otkaza (rušenja ili oštećenja).¹⁶⁶

Granična stanja i funkcija cilja

U inženjerstvu se koristi osnovna jednačina:

$$Z = R - S$$

Gdje je R otpornost (nosivost), a S uticaj (opterećenje).

- Ako je $Z > 0$, konstrukcija je sigurna.
- Ako je $Z \leq 0$, dolazi do otkaza.

U determinističkom pristupu, mi samo provjeravamo da li je R veće od S. Međutim, kod docentice Kuliš učimo da su i R i S slučajne promjenljive. To znači da postoji mala, ali realna vjerovatnoća da će se sresti "najslabiji materijal" sa "najvećim opterećenjem". Probabilistički pristup računa upravo tu vjerovatnoću.

4.1. POUZDANOST SERIJSKIH I PARALELNIH SISTEMA NA AUTOPUTU

Na autoputu ne promatramo samo jedan element, već cijeli sistem. Ovdje možemo primijeniti teoriju sistema:

1. Serijski sistem (Princip najslabije karike): Ako na mostu popusti samo jedan glavni ležaj, cijeli most može postati neupotrebljiv. Vjerovatnoća otkaza ovakvog sistema raste sa brojem elemenata.
2. Paralelni sistem (Redundancija): Kod kablova na visećim mostovima ili kod slojeva kolovozne konstrukcije, otkaz jednog dijela ne znači nužno slom cijelog sistema, jer ostali dijelovi preuzimaju opterećenje.

Ovo je ključno za planiranje održavanja dionice autoputa na kojoj se radi, jer nam omogućava da identificiramo "kritične tačke" (serijske elemente) koji zahtijevaju češći inspekcijski nadzor.

5. SOFTVERSKO MODELIRANJE I MONTE CARLO SIMULACIJE

U modernom inženjerstvu, ručni proračuni vjerovatnoće su previše složeni, pa se oslanjamo na računarske simulacije.

5.1. PRIMJENA MONTE CARLO METODE NA GEOTEHNIČKE PROBLEME

Monte Carlo metoda je jedna od najvažnijih u probabilističkom pristupu. Ona funkcioniše tako što računar vrši hiljade (ili milione) virtualnih testova. Na primjer, ako imamo nasip na autoputu, mi softveru kažemo da vlažnost tla varira između 10% i 18%, a čvrstoća betona u potpornom zidu između 30 i 40 MPa. Softver tada "nasumično" bira ove vrijednosti i računa stabilnosti.

5.2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI (SENSITIVITY ANALYSIS)

Ovo je izuzetno koristan alat za inženjere u praksi. Analiza osjetljivosti nam govori koji parametar najviše utiče na sigurnost autoputa. Često se ispostavi da mala promjena u kvalitetu drenaže (odvodnje) ima veći uticaj na stabilnost puta nego drastično povećanje debljine asfalta. Ovakve spoznaje omogućavaju ogromne uštede tokom izgradnje.

¹⁶⁶ Stojić, D., Matematički modeli u građevinarstvu: Deterministički vs. Stohastički pristup, Građevinsko arhitektonski fakultet Niš, Niš, 2018, 192-198. str.

ZAKLJUČAK

Kroz detaljnu analizu determinističkog i probabilističkog pristupa u ovom radu, jasno se kristalizira zaključak da nijedna od ovih metoda ne može u potpunosti zamijeniti onu drugu u kompleksnom okruženju kao što je izgradnja autoputa. Deterministički pristup, sa svojim krutim ali pouzdanim koeficijentima sigurnosti, decenijama je čuvao inženjersku struku od katastrofalnih grešaka. Njegova jednostavnost omogućava inženjeru na gradilištu da u realnom vremenu, pod pritiskom rokova i teške mehanizacije, donese brzu odluku o tome da li je određeni element siguran ili ne. Međutim, rad na dionicama autoputa, koje su prožete geološkim neizvjesnostima i varijacijama u kvalitetu materijala, pokazuje da je determinizam često "preskup" ili "preslijep" za suptilne rizike. Upravo tu probabilistički pristup unosi novu dimenziju – dimenziju mjerljivog rizika. On nam omogućava da prestanemo nagađati o sigurnosti i počnemo je izražavati kroz vjerovatnoću i indekse pouzdanosti. To nije samo matematička vježba; to je alat koji direktno utiče na ekonomsku održivost projekata. Optimizacija debljine asfalta ili armature u mostovima, bazirana na stvarnim podacima o saobraćaju i čvrstoći materijala, može uštedjeti milione konvertibilnih maraka bez ugrožavanja ijednog ljudskog života. Najvažnija spoznaja je da je inženjerstvo umjetnost upravljanja nesigurnošću. Moderni inženjer ne smije biti samo korisnik tablica i propisa, već mora razumjeti statističku prirodu svijeta oko sebe. Budućnost izgradnje autoputeva u Bosni i Hercegovini leži u digitalizaciji podataka sa gradilišta i njihovoj obradi kroz probabilističke modele, čime ćemo osiguranje kvaliteta podići na nivo koji standardni, deterministički proračuni jednostavno ne mogu dosegnuti. Ovaj rad je bio pokušaj da se taj most između teorije vjerovatnoće i betona na trasi autoputa učvrsti i jasno definira.

LITERATURA

1. Agencija za autoputeve (Interni dokumenti), Analiza varijabilnosti čvrstoće betona na dionici Koridora Vc, 2023.
2. Hrelja, E., Statistička kontrola kvaliteta u cestogradnji, Institut za puteve i hidrotehniku, Sarajevo, 2015, 40-45. str.
3. Institut za standardizaciju BiH, BAS EN 1990: Eurokod - Osnove projektovanja konstrukcija, Sarajevo, 2014.
4. Ivić, M., Popović, D., Teorija pouzdanosti konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2012, 55-58. str.
5. Radić, J., Sigurnost i trajnost mostova na autoputevima, Školska knjiga, Zagreb, 2010, 112-115. str.
6. Stojić, D., Matematički modeli u građevinarstvu: Deterministički vs. Stohastički pristup, Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Niš, 2018, 192-198. str.
7. Vukotić, R., Upravljanje rizikom na velikim infrastrukturnim projektima, Građevinski fakultet Podgorica, 2016, 77-82. str.

