

RAZVOJ MODELA ZA FAKTORE KOREKCIJE UGIBA FLEKSIBILNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA S OBZIROM NA TEMPERATURU

Mladenović Goran¹, Ištoka Otković Irena², Orešković Marko³

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

² Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i Arhitektonski fakultet Osijek, iirena@gfos.hr

³ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, moreskovic@grf.bg.ac.rs

Rezime: Temperatura asfaltnih slojeva ima, pored opterećenja, najznačajniji uticaj na veličinu ugiba ispod samog opterećenja ili blisko opterećenju. Postojeći modeli za faktore korekcije razvijeni su na bazi inostranih iskustava i ne podržavaju u potpunosti asfaltnu mešavinu koje se primenjuju u regionu. U radu je prikazano istraživanje sa ciljem da se razviju modeli za faktore korekcije koji se mogu primeniti u postupcima analize ugiba i proračuna nosivosti postojećih kolovoznih konstrukcija. Istraživanje se sastoji iz tri dela. Moduli asfaltnih mešavina AB11s za habajući sloj i BNS 22sA za gornji noseći sloj dobijeni su na osnovu master krivih konstruisanih na bazi laboratorijskih ispitivanja modula krutosti ovih mešavina. Proračun ugiba vršen je programom EVERSTRESS za tri nivoa fleksibilnih i polukrutih kolovoznih konstrukcija, sa debljinama asfaltnih slojeva od 100 mm do 210 mm. Dobijeni ugibi poslužili su za proračun faktora korekcije na referentnu temperaturu od 20°C za raspon temperatura od 10°C do 30°C koji se smatra realnim i poželjnim za merenje ugiba fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. Konačno, model za faktore korekcije razvijen je i validiran primenom neuronskih mreža. Model obuhvata fleksibilne i polukrute kolovozne konstrukcije, i pored temperature asfaltnih slojeva uključuje i debljinu slojeva i rastojanje ugibomera od centra opterećenja.

Ključne reči: Ugib, fleksibilna kolovozna konstrukcija, modul krutosti, neuronske mreže, regresioni modeli

DEVELOPMENT OF MODEL FOR TEMPERATURE CORRECTION FACTORS OF FLEXIBLE PAVEMENT DEFLECTIONS

Mladenović Goran¹, Ištoka Otković Irena², Orešković Marko³

¹ University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, oreskovic@grf.bg.ac.rs

² Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture, iirena@gfos.hr

³ University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

Abstract: The temperature of asphalt layers has, in addition to loading, the most significant influence on the pavement deflections below the load and within the deflection bowl. Existing models for temperature correction factors have been developed on the basis of foreign experience and do not take into account the asphalt mixtures used in the region. The paper presents a research with the aim of developing models for correction factors that can be applied in the procedures of deflection analysis and bearing capacity calculation of existing pavement structures. The research consists of three parts. The stiffness moduli of asphalt mixtures AC11s for the wearing course and AC22sA for the base layer were obtained from their master curves, which were constructed on the basis of laboratory tests of stiffness modulus. The calculation of deflection was performed by the EVERSTRESS program for three levels of flexible and semi-rigid pavement structures, with asphalt layer thicknesses from 100 mm to 210 mm. The obtained deflections were used for the calculation of the correction factor to the reference temperature of 20°C for the temperature range from 10°C to 30°C, which is considered realistic and desirable for deflection measurements on flexible pavement structures. Finally, a model for correction factors was developed and validated using neural networks. The model includes flexible and semi-rigid pavement structures, and in addition to the temperature of the asphalt layers, it also includes the thickness of the layers and the distance of the deflection from the center of the loading.

Keywords: Deflection, flexible pavement, stiffness modulus, neural networks, regression models

1. UVOD

Temperatura asfaltnih slojeva ima, pored opterećenja, najznačajniji uticaj na veličinu ugiba ispod samog opterećenja ili blisko opterećenju. Postojeći modeli za faktore korekcije, koji se primenjuju za korekciju ugiba u postupcima za analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija razvijeni su na bazi inostranih iskustava, a neki od njih datiraju iz vremena kada je vršena korekcija samo maksimalnog ugiba, s obzirom da je raspoloživa oprema uključivala samo Benkelmenovu gredu ili eventualno deflektograf LaCroix. U međuvremenu je u regionu nabavljen veći broj ugibomera sa padajućim teretom, što je omogućilo primenu sofisticiranih modela proračuna poput analize različitih parametara defleksionih bazena, kao i povratnog proračuna modula slojeva kolovoznih konstrukcija (backcalculation). Za primenu ovih modela je neophodno što tačnije proceniti ugibe konstrukcije u

referentnim uslovima, što znači da je neophodna korekcija i drugih ugiba, a ne samo maksimalnog. S druge strane, raspoloživi modeli ne podržavaju u potpunosti asfaltne mesavine, kao ni strukturu kolovoznih konstrukcija koje se primenjuju u regionu.

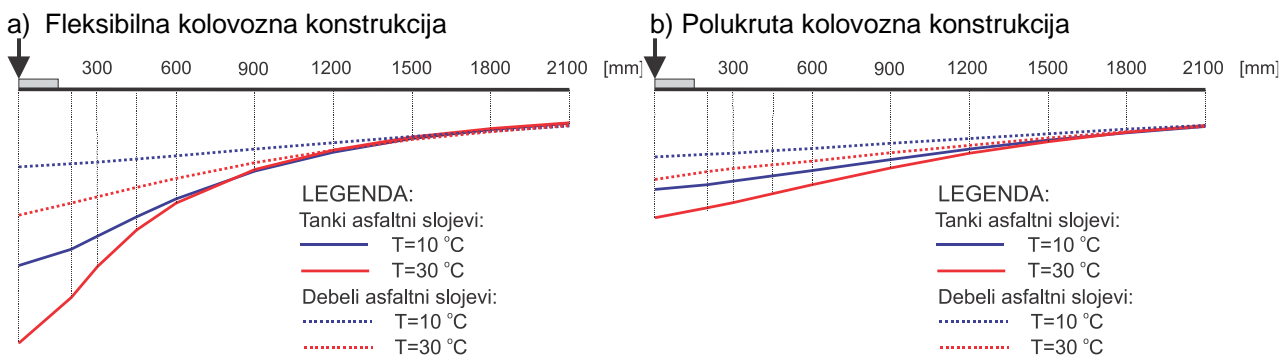
Stoga je cilj ovog rada bio da se razviju modeli za korekciju ugiba s obzirom na temperature asfaltnih slojeva koji će uzeti u obzir realne karakteristike materijala, kao i strukture kolovoznih konstrukcija zastupljene na putevima u regionu.

2. PREGLED POSTOJEĆIH MODELA ZA KOREKCIJU UGIBA

Temperatura asfaltnih slojeva kolovozne konstrukcije u vreme merenja ugiba predstavlja jedan od najznačajnijih faktora koji utiču na vrednosti izmerenih defleksija, pogotovo onih koje se nalaze bliže samom opterećenju.

U uputstvu AASHTO [1] za dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija je definisan opšti postupak za korekciju maksimalnog ugiba, koji je u skladu sa samim postupkom određivanja efektivne nosivosti kolovoznih konstrukcije. Međutim, značajan broj postupaka za analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija se bazira i na primeni drugih defleksija u okviru defleksionog bazena osim maksimalne i postavlja se pitanje koje defleksije i u kojoj meri treba korigovati da bi dali uporedive parametre nosivosti kolovozne konstrukcije. Primer za to je Indeks zakrivljenosti, koji predstavlja razliku između maksimalnog ugiba i ugiba izmerenog na 300 mm od centra opterećenja i na čiju vrednost značajno utiče temperatura asfaltnih slojeva prilikom merenja.

Odgovor na pitanje koje defleksije i u kojoj meri treba korigovati zavisi od tipa kolovozne konstrukcije i debljine asfaltnih slojeva (slika 1), ali i od tipa bitumena i vrste, odnosno krutosti asfaltne mešavine. U novije vreme se sve više primenjuje polimer modifikovan bitumen u habajućem i veznom (ukoliko postoji), a sve češće i u nosećim asfaltnim slojevima kolovozne konstrukcije, što ima značajnog efekta na njihovu krutost, pa samim tim i na rezultujuće defleksije površine kolovozne konstrukcije.



Slika 1. Defleksioni bazeni za tanke i debele fleksibilne i polukrute kolovozne konstrukcije na temperaturama asfaltnih slojeva od 10 °C i 30 °C

U pojedinim zemljama su vršena određena eksperimentalna istraživanja kako bi se definisale odgovarajuće procedure za korekciju ugiba. Van Gurp [2] je analizirao uticaj okoline na deformaciju kolovoza u Holandiji i definisao postupak proračuna faktora korekcije za različite opcije indeksa zakrivljenosti defleksionog bazena primenom jednačine:

$$TNF = 1 + \left(a_1 + \frac{a_2}{h_1} \right) * (T_A - 20) + \left(a_3 + \frac{a_4}{h_1} \right) * (T_A - 20)^2 \quad (1)$$

gde su:

TNF – faktor korekcije

T_A – temperatura asfaltnog sloja (°C)

h_1 – debljina asfaltnog sloja (mm)

a_1, a_2, a_3, a_4 – koeficijenti datu u tabeli 1 u funkciji od parametra za koji se vrši korekcija.

Tabela 1. Koeficijenti Van Gurp-ovog modela za faktore korekcije

Parametar	a_1 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	a_2 ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)	a_3 ($0.001\ ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	a_4 ($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)
d_0	0.01661	-0.67095	0.28612	-0.01408
$d_0 - d_{225}$	0.05955	-2.73223	1.48011	-0.08171
$d_0 - d_{300}$	0.05398	-2.61130	1.28439	-0.07493
$d_0 - d_{450}$	0.04720	-2.39175	1.05022	-0.06371
$d_0 - d_{600}$	0.04190	-2.15168	0.87228	-0.05301

Izvor: Van Gurp, C. [2]

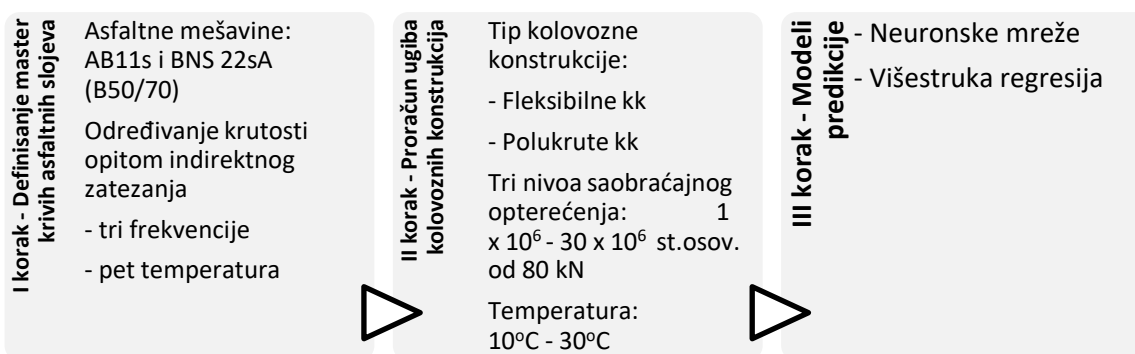
Chen [3] je razvio univerzalnu jednačinu za korekciju ugiba i modula u Teksasu. Ova studija je preporučila da treba korigovati samo ugibe na rastojanju manjem od 203 mm od centra opterećenja, što je vrlo diskutabilno, pogotovo kod kolovoznih konstrukcija sa debljim asfaltnim slojevima. Lukanen i ost. [4] su na bazi analize LTPP podataka razvili modele za parametre defleksionog bazena koji zavise od debljine asfaltnih slojeva, temperature u sredini debljine asfaltnih slojeva, krutosti posteljice, dubine do čvrstog (nedeformabilnog) sloja i geografske širine. Kao indikator krutosti posteljice korišćen je ugib na 914 mm (36 in) od centra opterećenja. Ovi modeli se mogu primarno koristiti za proračun parametara defleksionog bazena u funkciji temperature, pa onda posredno i za proračun faktora korekcije. U pogledu faktora za korekciju maksimalnog ugiba d_0 , dobijene relacije daju sličnu zavisnost kao i AASHTO uputstvo. Park i ost. [5] su analizirali primenu LTPP postupka na deonicama u Severnoj Karolini i zaključili da ovaj postupak daje nedovoljnu korekciju za ugibe kolovoznih konstrukcija sa asfaltnim slojevima debljim od 242 mm, pri visokim temperaturama.

Neuronske mreže su često korišćeni alat u rešavanju inženjerskih problema [6]. Interes naučne javnosti za primenu neuronskih mreža [7] i neuro-fuzzy logike [8] u predviđanju ponašanja kolovoznih konstrukcija ne jenjava. Neuronske mreže se koriste u analizi ponašanja kolovoza pod opterećenjem [9,10], za predviđanje zamora asfaltnih mešavina [11] i akumulirane deformacije kod asfaltnih mešavina sa modifikovanim bitumenom [12]. U analizi trajnih deformacija asfaltnih mešavina koriste se modeli bazirani na primeni genetskog programiranja [13], neuro-fuzzy metodologije [14] i neuronskih mreža [15].

Konkretni cilj ovog rada je da se na setu fleksibilnih i polukrutih kolovoznih konstrukcija koje pokrivaju tipičan raspon saobraćajnog opterećenja za puteve u Srbiji i regionu izvrši proračun i modeliranje ugiba pri rasponu temperatura asfaltnih slojeva od 10°C do 30°C , uzimajući u obzir master krive krutosti tipičnih asfaltnih mešavina dobijene laboratorijskim ispitivanjem i da se razviju modeli za korekciju svih ugiba u defleksionom bazenu, što bi omogućilo korigovanje i parametara defleksionog bazena koji se primenjuju za proračun nosivosti postojećih kolovoznih konstrukcija.

3. METODOLOGIJA

Istraživanje prikazano u radu se sastoji iz tri dela (slika 2).

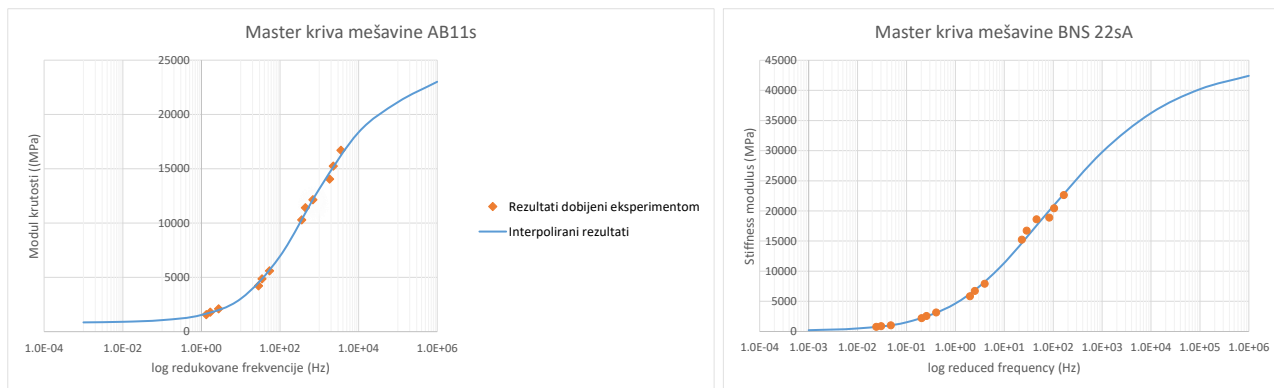


Slika 2. Metodologija određivanja modela za faktore korekcije ugiba kolovoznih konstrukcija s obzirom na temperaturu

Prvi deo sastojao se u ekperimentalnom ispitivanju modula krutosti asfaltnih mešavina AB11s, koja se koristi za habajući sloj, i BNS 22sA, koja se koristi za gornji noseći sloj kolovoznih konstrukcija. Ispitivanje je vršeno opitom indirektnog zatezanja na frekvencijama od 2 Hz, 2.51 Hz i 3.98 Hz. Uzorci obe asfaltna mešavine su

ispitani na temperaturama od 5°C, 10°C, 20°C i 30°C, dok je asfaltna mešavina BNS 22sA ispitana i na temperaturi od 40°C. Obe mešavine su rađene sa putnim bitumenom B 50/70.

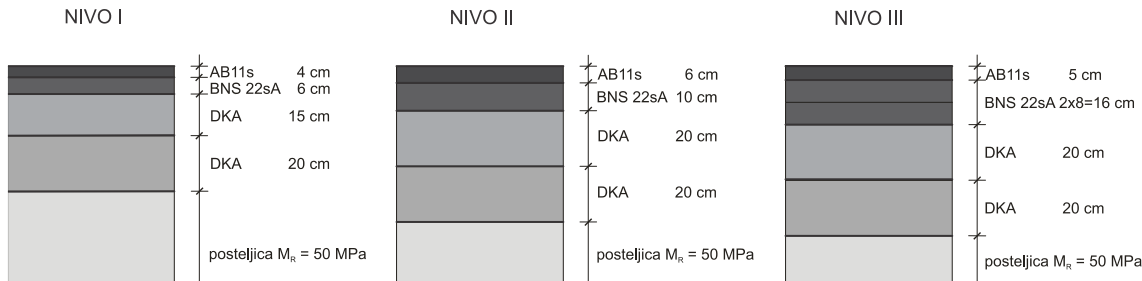
Master krive, određene primenom sigmoidalnog modela za referentnu temperaturu od 20°C, su prikazane na slici 3. Redukovane frekvencije su određene primenom Arhenijusove jednačine.



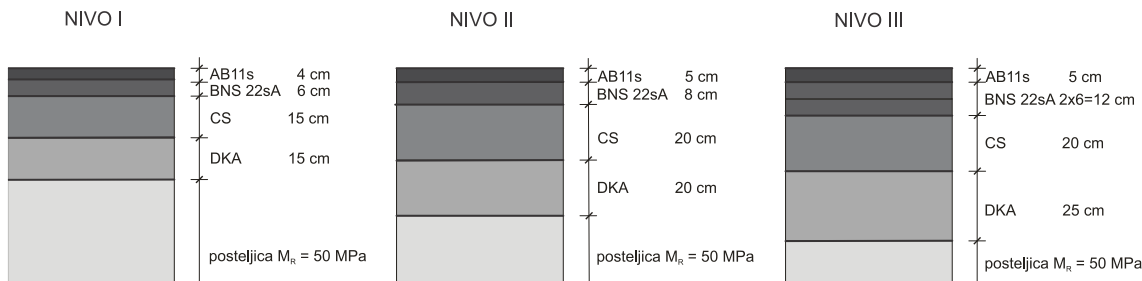
Slika 3. Master krive asfaltnih mešavina korišćenih u analizi

Za proračun su definisane po tri fleksibilne i polukrute kolovozne konstrukcije koje generalno pokrivaju raspon saobraćajnog opterećenja od 1×10^6 do 30×10^6 standardnih osovina od 80 kN, koji odgovara najvećem delu puteva u Srbiji i regionu (slika 4). Za posteljicu je usvojena vrednost CBR = 5%, odnosno povratni modul $M_r = 50$ MPa. Za donju podlogu je modelirana primena drobljenog kamenog agregata kod fleksibilnih kolovoznih konstrukcija (slika 4a), odnosno drobljenog kamenog agregata i cementne stabilizacije kod polukrutih kolovoznih konstrukcija (slika 4b). Debljina asfaltnih slojeva se kretala od 10 do 21 cm za fleksibilne, odnosno od 10 do 17 cm za polukrute kolovozne konstrukcije.

a. Fleksibilne kolovozne konstrukcije



b. Polukrute kolovozne konstrukcije



Slika 4. Kolovozne konstrukcije korišćene u analizi

U tabeli 2 date su karakteristike slojeva kolovozne konstrukcije koje su primenjene u proračunu.

Tabela 2. Karakteristike slojeva kolovozne konstrukcije

Sloj	Debljina (cm)	Modul (MPa)	Poasonov koeficijent
Zastor AB 11s	4 - 6	2.800 – 15.750	0.35
Gornji noseći sloj BNS 22sA	6 - 16	4.200 – 20.500	0.35
Cementna stabilizacija	15 - 20	8.000	0.20
Donji noseći sloj - DKA	30	130	0.40
	35	138	
	40	148	
	45	156	
Posteljica		50	0.45

Proračun uticaja u kolovoznoj konstrukciji izvršen je primenom modela EVERSTRESS. Modelirano je opterećenje od 50 kN koje se prenosi preko kontaktne ploče radijusa 15 cm. Ugibi kolovozne konstrukcije su računati ispod opterećenja i na rastojanjima od 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm i 1500 mm, 1800 mm i 2100 mm od centra opterećenja.

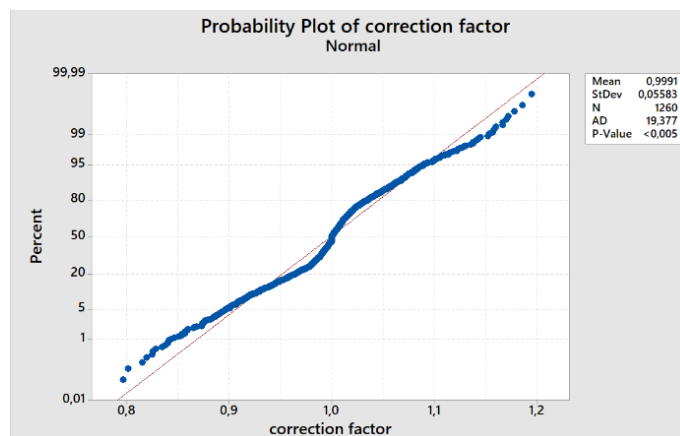
Treći deo istraživanja je obuhvatio analizu podataka i razvoj modela za predikciju faktora korekcije s obzirom na temperaturu. Osnovni statistički podaci baze podataka prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Osnovni statistički podaci

	N	SV	SD	Madiana	Min	Max	Varijanca	AD	p
Faktor korekcije	1260	0,9991	0,05583	1,000	0,79669	1,19522	0,00312	19,38	< 0,005

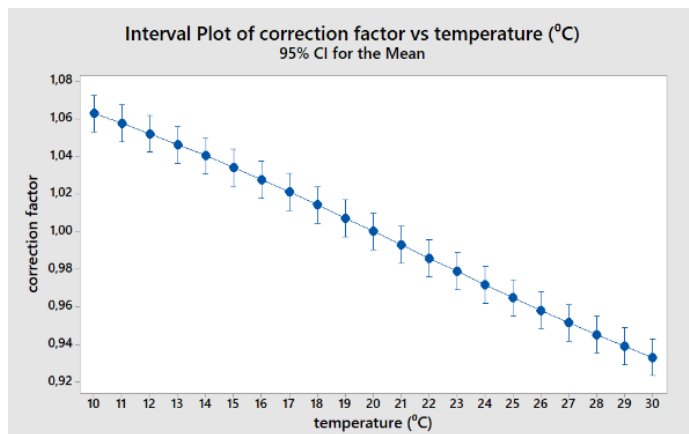
SV- srednja vrednost, SD – standardna devijacija, AD – rezultat Anderson Darling testa, p-vrednost AD testa

Normalnost podataka je testirana Anderson-Darling testom. Nulta hipoteza testa je da podaci prate normalnu distribuciju i postavljen je nivo značajnosti od 0,05. Prema rezultatima prikazanim na slici 5, nulta hipoteza se može odbaciti (p-vrednost < 0,05) i može se zaključiti da podaci ne prate normalnu distribuciju.



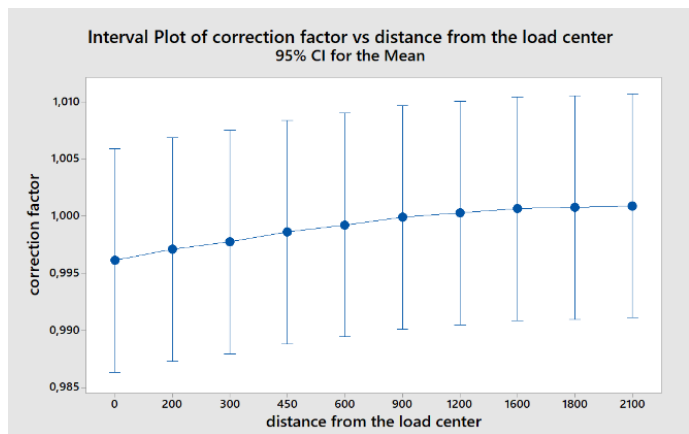
Slika 5. Grafikon verovatnoće faktora korekcije

Pirsonova korelacija se koristi za procenu jačine i pravca povezanosti između dve neprekidne varijable koje su linearno povezane. Utvrđena je jaka negativna korelacija između temperature i faktora korekcije za celu bazu podataka (Pearson-ov koeficijent korelacije, $r = -0,725$ i statistička značajnost Pearson-ovog koeficijenta korelacije, p-vrednost = 0,000, što zadovoljava uobičajenu graničnu vrednost za statističku značajnost $p < 0,05$). Zavisnost faktora korekcije i temperature ($^{\circ}\text{C}$) prikazana je na slici 6.



Slika 6. Zavisnost faktora korekcije i temperature (°C)

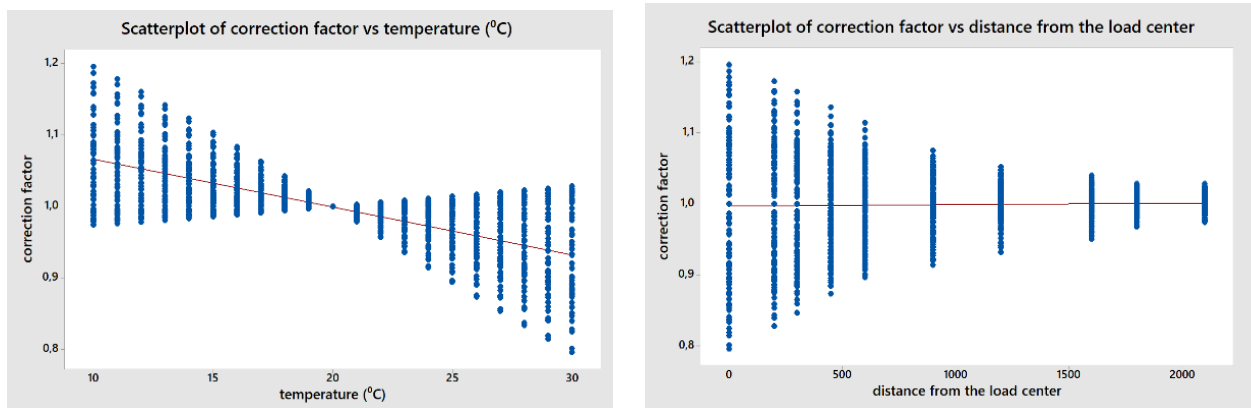
Analizirana je zavisnost udaljenosti od centra opterećenja (mm) i faktora korekcije na cijeloj bazi podataka (slika 7). Može se uočiti da je zavisnost korekcionih faktora od udaljenosti od centra opterećenja sve manja kako se ide ka spoljnim delovima defleksionih bazena.



Slika 7. Odnos faktora korekcije i udaljenosti od centra opterećenja (mm)

Za svaki tip kolovozne konstrukcije napravljena je analiza uticaja debljine asfaltnih slojeva na faktor korekcije. Uticaj je utvrđen, ali se nije pokazao kao statistički značajan prema statističkom modelu, dok prema modelu neuronske mreže jeste.

Na slici 8 prikazana je distribucija podataka faktora korekcije (scatterplot) za dve najuticajnije ulazne varijable.



Slika 8. Raspodela faktora korekcije u odnosu na temperaturu (levo) i udaljenost od centra opterećenja (desno)

4. MODELI PREDIKCIJE

U okviru ovog poglavlja prikazan je razvoj modela predikcije primenom neuronskih mreža, kao i regresioni modeli za fleksibilne i polukrute kolovozne konstrukcije.

4.1 Model predikcije primenom neuronske mreže

U prvom delu ovog potpoglavlja će biti prikazan model predikcije primenom neuronskih mreža, a zatim njegova nezavisna validacija.

4.1.1 Model predikcije

Baza podataka faktora korekcije ima 4 ulazna parametra, kao što je opisano u prethodnom poglavlju. Baza podataka sadrži ukupno 1260 primera, a slučajnim odabirom izdvojeno je 40 primera koji će poslužiti kao validacijska baza za nezavisnu validaciju modela. Od baze podataka koja sadrži ukupno 1220 podataka za učenje neuronske mreže unutar software-a NeuroShell2 napravljena su dva skupa podataka – trening skup (80%) sa 976 primera za učenje neuronske mreže i test skup (20%) sa 244 primera za ocenu uspešnosti predikcije. U postavkama je zadato da se pamte težinski koeficijenti za najbolji rezultat na test skupu podataka.

Ovako velika baza podataka u najvećem broju slučajeva sprečava problem pretreniranosti mreže. Jedan od uzroka pretreniranosti može biti odnos broja ulaznih parametara i veličine skupa za treniranje mreže. Ukoliko je broj ulaznih parametara velik, a broj primera u skupu za učenje mali, mreža će radije pamtiti, nego učiti i generalizovati na trening setu podataka. Treba imati u vidu da odnos broja ulaznih parametara i veličine skupa za učenje mreže nisu jedini uzrok koji dovodi do efekta loše generalizacije mreže, pa će se u okviru ovog rada napraviti ocena generalizacije mreže u dva koraka – u okviru software-a na test skupu podataka (244 podatka) i nezavisna validacija na nezavisnom skupu za validaciju (40 podataka).

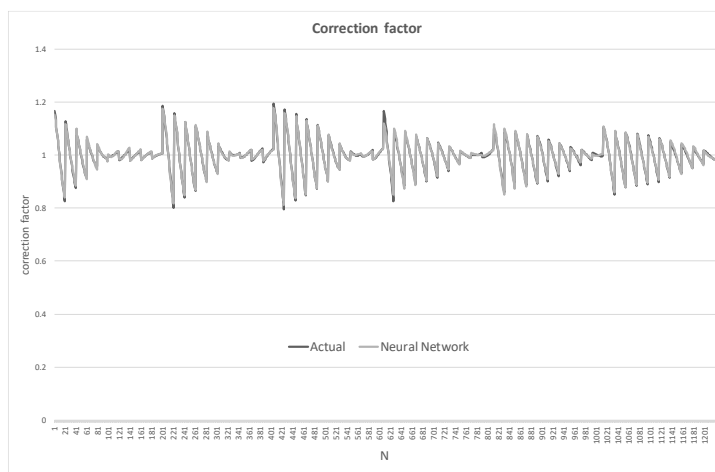
Podaci o konfiguraciji i osnovnim karakteristikama Ward net mreže koja je dala najboji rezultat predikcije dati su u tabeli 4.

Tabela 4. Podaci o konfiguraciji i osnovnim karakteristikama Ward net mreže

SLOJEVI	BROJ NEURONA	FUNKCIJA AKTIVACIJE
Ulazni sloj	4	Linear [-1,1]
Skriveni sloj 1	20	Gaussian
Skriveni sloj 2	20	Tanh
Skriveni sloj 3	20	Gaussian compact
Izlazni sloj	1	Logistic

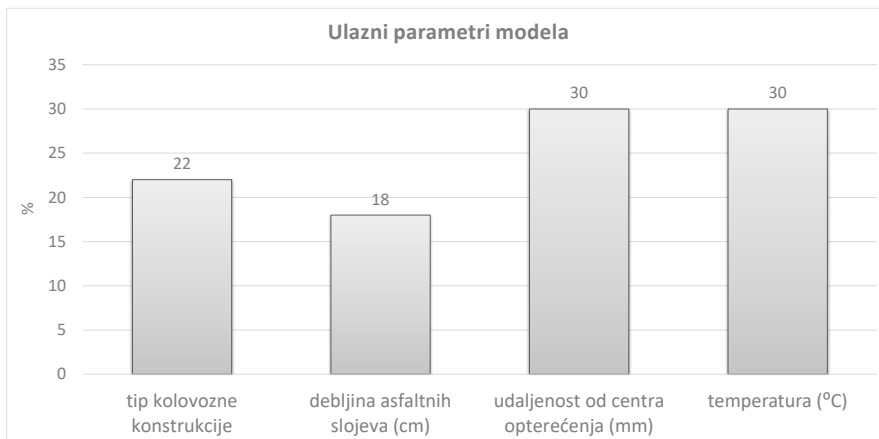
Model predikcije faktora korekcije dao je sledeće rezultate, koeficijent višestruke determinacije $R^2= 99,2 \%$, koeficijent korelacije 99,6%, srednja asolutna greška 0,003 (minimalna 0, maksimalna 0,047), što govori da niti jedan rezultat predikcije nije imao grešku veću od 5%.

Rezultati predikcije neuronske mreže na bazi podataka u odnosu na ciljne podatke prikazani su na slici 10.



Slika 10. Odnos stvarnih i faktora korekcije primenom neuronske mreže

Ovako dobar rezultat predikcije daje osnovu za analizu uticaja svakog ulaznog parametara na rezultat predikcije, što je prikazano je na slici 11.



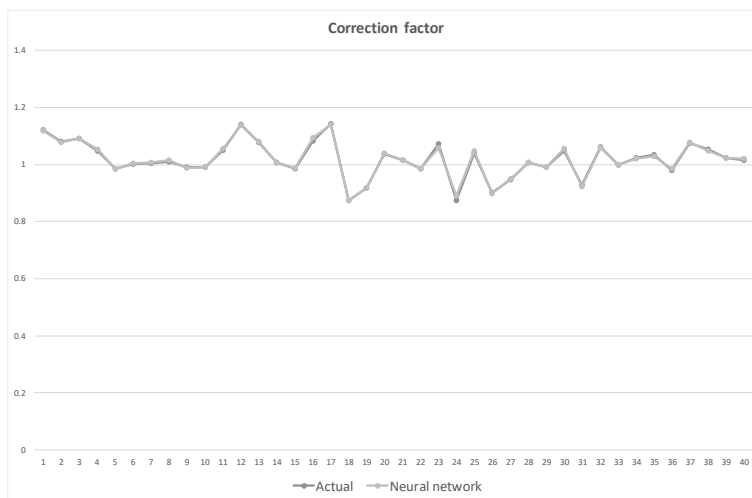
Slika 11. Uticaj ulaznih parametara na rezultat predikcije

Iz rezultata je jasno vidljivo da je neuronska mreža prepoznala sve ulazne parametre kao značajne u formiranju modela predikcije i matematički ih povezala sa ciljnim vrednostima predikcije sa vrlo visokom korelacijom. Na osnovu slike 11 se vidi da rastojanje ugibomera od centra opterećenja ima najznačajniji uticaj na faktore korekcije pored same temperature. Takođe značajan uticaj ima i tip kolovozne konstrukcije (fleksibilna ili polukruta), dok sama debljina asfaltnih slojeva ima najmanji uticaj.

4.1.2 Validacija modela

Cilj formiranja modela je da se uspostavi zavisnost između ulaznih varijabli i ciljne zavisne varijable i da se funkcija predikcije koju je formirala neuronska mreža može koristiti na novim skupovima podataka. U slučajevima kada funkcija predikcije na novim podacima daje dobru korelaciju sa ciljnim vrednostima, može se smatrati da ima dobru generalizaciju (tačnost rezultata modeliranja) i takav model može se koristiti u primerima kada ne postoje izmerene ciljne vrednosti, nego samo ulazni podaci. Nezavisna validacija daje realan uvid u tačnost modela i po pravilu je potrebno napraviti ovaj korak pre primene modela u naučnoj i stručnoj praksi.

Nezavisna validacija ovog modela napravljena je na skupu od 40 podataka, koje neuronska mreža nije videla niti u trening skupu, niti u test skupu podataka. Pokazatelji uspešnosti validacije modela su sledeći: srednja apsolutna greška predikcije je 0.0037, minimalna greška je 6.43395E-05, a maksimalna 0,018, dok je koeficijent korelacije je 99.69%. Rezultati jasno pokazuju da mreža ima sposobnost generalizacije i da su rezultati predikcije modela još i bolji nego na trening skupu podataka (slika 12).



Slika 12. Rezultati validacije modela

4.2 Statistički modeli višestruke regresije

Visoka korelacija koju je dao model neuronskih mreža ukazuje na mogućnost da bi i statistički modeli višestruke regresije mogli imati potencijal, a jednostavniji su za primenu. Zbog različitog uticaja debljine asfaltnih slojeva za različite tipove kolovoznih konstrukcija napravljeni su odvojeni statistički modeli višestruke regresije za fleksibilne i za polukrute kolovozne konstrukcije.

4.2.1 Fleksibilna kolovozna konstrukcija

Model višestruke regresije za faktor korekcije za fleksibilne kolovozne konstrukcije glasi:

$$C = 1.1935 + 0.008369 * X_1 - 0.000193 * X_2 - 0.010678 * X_3 + 0.000039 * X_3^2 - 0.000412 * X_1 * X_3 + 0.000010 * X_2 * X_3$$

pri čemu su:

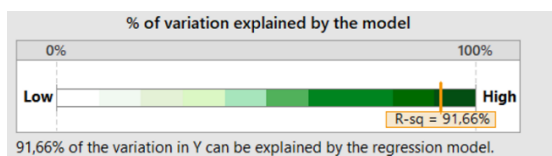
C – faktor korekcije

X1 – debljina asfaltnih slojeva (cm)

X2 – rastojanje od centra opterećenja (mm)

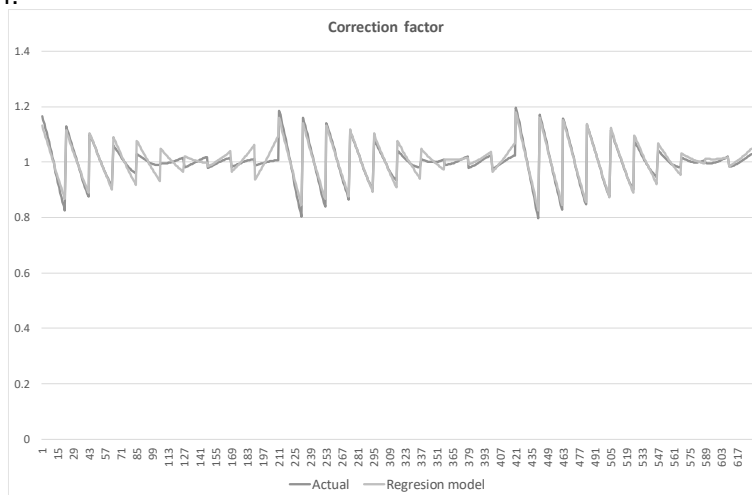
X3 – temperature asfaltnih slojeva (°C)

Srednja apsolutna greška modela iznosi 0.0167, koeficijent višestruke determinacije je $R^2 = 91.66\%$ (slika 13), a koeficijent korelacije 95,41%.



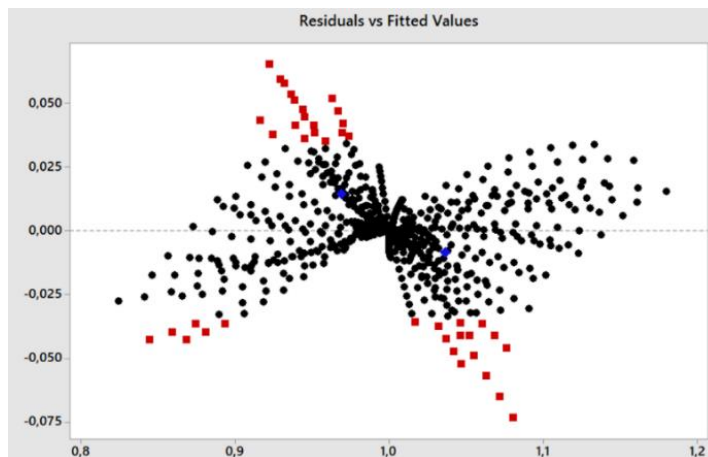
Slika 13. Stepen varijabilnosti objašnjen regresionim modelom za fleksibilne kolovozne konstrukcije

Rezultati predikcije regresionog modela za predikciju faktora korekcije za fleksibilnu kolovoznu konstrukciju prikazani su na slici 14.



Slika 14. Rezultati predikcije regresionog modela za fleksibilne kolovozne konstrukcije

Podaci obuhvaćeni prihvatljivom predikcijom modela prikazani su na slici 15.



Slika 15. Neprihvatljive (crveno) u odnosu na prihvatljive vrednosti predikcije (crno) za regresioni model za fleksibilne kolovozne konstrukcije

4.2.2 Polukruta kolovozna konstrukcija

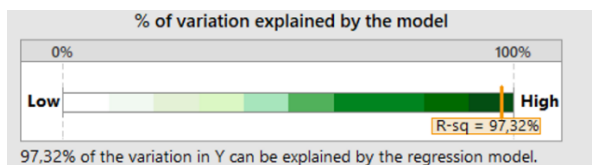
Model višestruke regresije za faktor korekcije za polukrute kolovozne konstrukcije glasi:

$$C = 1.16467 + 0.003587 \cdot X_1 - 0.000116 \cdot X_2 - 0.006570 \cdot X_3 - 0.000083 \cdot X_3^2 - 0.000193 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0.000006 \cdot X_2 \cdot X_3$$

pri čemu su:

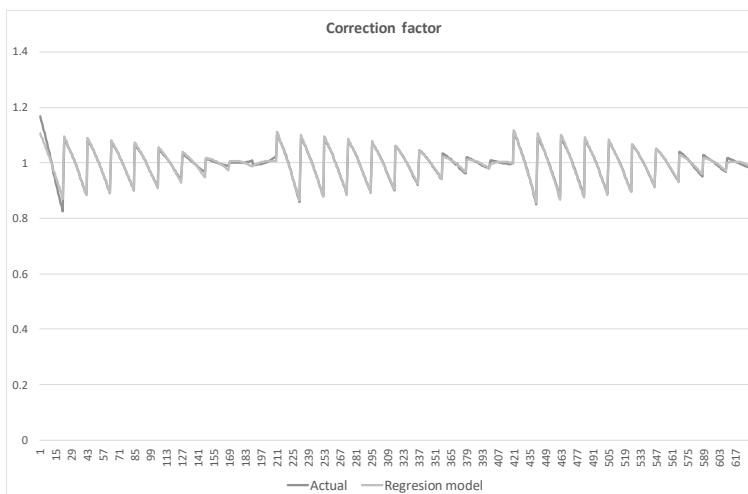
- C – faktor korekcije
- X1 – debljina asfaltnih slojeva (cm)
- X2 – rastojanje od centra opterećenja (mm)
- X3 – temperature asfaltnih slojeva (°C)

Srednja apsolutna greška modela je 0.0048, koeficijent višestruke determinacije je $R^2 = 97.32\%$ (slika 16), a koeficijent korelacije 98,65%.



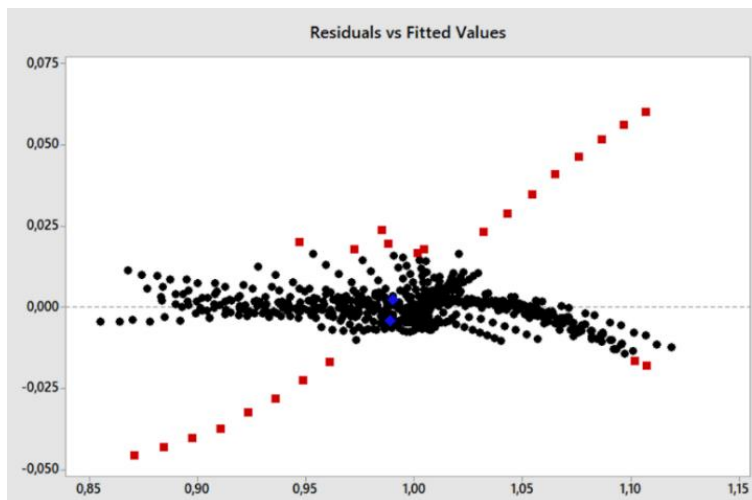
Slika 16. Stepen varijabilnosti objašnjen regresionim modelom za polukrute kolovozne konstrukcije

Rezultati predikcije regresionog modela za faktore korekcije za polukrutu kolovoznu konstrukciju prikazani su na slici 17.



Slika 17. Rezultati predikcije regresionog modela za polukrute kolovozne konstrukcije

Podaci obuhvaćeni prihvatljivom predikcijom modela prikazani su na slici 18.



Slika 18. *Neprihvatljive (crveno) u odnosu na prihvatljive vrijednosti predikcije (crno) za regresioni model za polukrute kolovozne konstrukcije*

4. ZAKLJUČAK

Određivanje faktora korekcije izmerenih ugiba fleksibilnih i polukrutih kolovoznih konstrukcija u zavisnosti od temperature asfaltnih slojeva predstavlja izuzetno važan korak u određivanju nosivosti postojećih kolovoza, koji ima veliki uticaj na rezultat proračuna i posledično na rešenje rehabilitacije/rekonstrukcije postojeće kolovozne konstrukcije.

U radu su prikazani predikcioni modeli za određivanje faktora korekcije primenom neuronskih mreža, kao i primenom višestruke regresije. Modeli su razvijeni na bazi proračuna ugiba seta fleksibilnih i polukrutih konstrukcija koje obuhvataju realne uslove saobraćajnog opterećenja u regionu, kao i realne karakteristike primenjenih materijala u konstrukcijama.

Kod modela baziranog na neuronskoj mreži jasno je potvrđeno da pored temperature najznačajniji uticaj ima rastojanje ugibomera od centra opterećenja, što je u saglasnosti sa raspodelom naprezanja od opterećenja u kolovoznoj konstrukciji.

Modeli zasnovani na višestrukoj regresiji su razvijeni posebno za fleksibilne i posebno za polukrute kolovozne konstrukcije i pored temperature i rastojanja od centra opterećenja uključuju i debljinu asfaltnih slojeva. Za oba razvijena modela su dobijene vrednosti R^2 od preko 90%, što ukazuje da su oni u stanju da pouzdano procene odgovarajuće vrednosti faktora korekcije, a pogodni su za svakodnevnu inženjersku primenu u analizi nosivosti kolovoznih konstrukcija.

Literatura

- [1] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1993.
- [2] Van Gorp, C. Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of falling weight deflectometers, dokt.dis, Delft Technical University, 1995.
- [3] Chen, D.-H.; Bilyeu, J.; Lin, H.-H.; Murphy, M. Temperature correction on falling weight deflectometer measurements. *Transp. Res. Rec.* 2000, 1716, 30–39.
- [4] Lukanen, E.O.; Stubstad, R.N.; Briggs, R. Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement; FHWA-RD-98-085; Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 2000.
- [5] Park, H.M.; Kim, Y.R.; Park, S. Temperature correction of multiloading-level falling weight deflectometer deflections. *Transp. Res. Rec.* 2002, 1806, 3–8.

- [6] Adeli, H. 2001. Neural Networks in Civil Engineering: 1989–2000, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 16: 126–142
- [7] Attoh-Okine, N.O. 1999. Analysis of learning rate and momentum term in backpropagation neural network algorithm trained to predict pavement performance, Advances in Engineering Software30(4): 291–302 [doi:10.1016/S0965-9978\(98\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00071-4)
- [8] Bianchini, A.; Bandini, P. 2010. Prediction of Pavement Performance through Neuro-Fuzzy Reasoning, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 25: 39–54
[doi: 10.1111/j.1467-8667.2009.00615.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2009.00615.x)
- [9] Ghanizadeh, A. R.; Ahadi, M. R. 2015. Application of Artificial Neural Networks for Analysis of Flexible Pavements under Static Loading of Standard Axle, International Journal of Transportation Engineering 3 (1): 31-43
- [10]Rodriguez, C. M. 2015. Predicting pavement performance under traffic loading using genetic algorithms and artificial neural networks to obtain resilient modulus values, Doctoral dissertation, The Ohio State University
- [11]Xiao, F.; Amirkhanian, S.; Juang, C. H. 2009. Prediction of Fatigue Life of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Using Artificial Neural Networks, Journal of Materials in Civil Engineering 21:253-261
[doi: 10.1061/ ASCE 0899-1561 2009 21:6 253](https://doi.org/10.1061/ASCE0899-15612009216253)
- [12]Tapkın S.; Çevik, A.; Uşar, U. 2009. Accumulated strain prediction of polypropylene modified Marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks, Expert Systems with Applications 36: 11186-11197 [doi:10.1016/j.eswa.2009.02.089](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.089)
- [13]Gandomi, A. H.; Alavi, A. H; Mirzahosseini, M. R.; Nejad, F. M. 2011. Nonlinear Genetic-Based Models for Prediction of Flow Number of Asphalt Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering 23(3): 248-263 [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000154](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000154)
- [14]Moghaddam, T.B.; Soltani, M.; Karim, M.R.; Shamsirband, S.; Petković, D.; Baaj, H. 2015. Estimation of the rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures by adaptive neuro-fuzzy methodology, Construction and Building Materials 96: 550-555
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.043>
- [15]Shafabakhsh, G.H.; Ani, O. J.; Talebsafa, M. 2015. Artificial neural network modelling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates, Construction and Building Materials 85: 136–143
[doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.060](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.060)