

ANALIZA ASFALTNIH KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA NA TEMELJU PODATAKA STRUKTURALNE NOSIVOSTI

ANALYSIS OF ASPHALT PAVEMENT STRUCTURES BASED ON STRUCTURAL BEARING CAPACITY DATA

**Marijana Cuculić*, Ivana Pranjić*, Aleksandra Deluka Tibljaš*,
Ivan Stanić****

Sažetak

Ocjena strukturalnog stanja kolnika definira ukupnu nosivost kolnika, a određuje se kroz ocjenu mehaničkih svojstava slojeva kolničke konstrukcije. Defleksija predstavlja elastičnu deformaciju kolničke konstrukcije i jedan je od važnih pokazatelja strukturalne nosivosti kolnika. Iznos defleksije moguće je utvrditi teorijski, korištenjem zakonitosti teorije elastičnosti i poznavanjem materijalnih svojstava kolničke konstrukcije, ili empirijski, mjerenjem elastične deformacije generirane poznatim statičkim ili dinamičkim opterećenjem na površini kolnika, najčešće korištenjem uređaja s padajućim teretom (FWD uređaj).

U ovom radu opisane su teorijske metode za određivanje strukturalne nosivosti kolničke konstrukcije, s naglaskom na defleksiju kao prevladavajući tehnički parametar za utvrđivanje ocjene strukturalnog stanja kolnika. Opisan je empirijski postupak utvrđivanja defleksije FWD uređajem te je dan pregled utjecajnih činitelja na izmjerene iznose defleksije. Prikazani su indeksi proizašli iz mjerenja defleksije, koji se koriste za utvrđivanje strukturalne ocjene kolnika. Na primjeru analize stanja kolničke konstrukcije provedene u sklopu diplomskog rada prikazana je važnost provedbe kontinuiranog mjerenja u svrhu utvrđivanja strukturalnog stanja i ocjene kolničke konstrukcije.

Ključne riječi: defleksija, kolnička konstrukcija, strukturalna nosivost

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: [marijana.cuculic, ivana.pranjic, aleksandra.deluka}@gradri.uniri.hr](mailto:{marijana.cuculic, ivana.pranjic, aleksandra.deluka}@gradri.uniri.hr)

** Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: ivan.stanic@student.uniri.hr

Abstract

The assessment of pavement structural condition defines the total bearing capacity of the pavement, and is determined through the assessment of the mechanical properties of pavement structure layers. Deflection of the pavement structure is one of the important indicators of the structural bearing capacity of the pavement. It represents the elastic deformation of the pavement structure and is inversely proportional to the bearing capacity of the pavement. The amount of deflection can be determined theoretically, by using the laws of the theory of elasticity and knowing the material properties of the pavement structure, or empirically, by measuring the elastic deformation generated by a known static or dynamic load on the pavement surface, usually using a falling weight deflectometer device (FWD device).

This paper describes the theoretical methods for determining the structural bearing capacity of pavement structure, with emphasis on deflection as the predominant technical parameter for determining the assessment of pavement structural condition. An empirical procedure for determining deflection and an overview of influencing factors on the measured amounts of deflection are described. The indices derived from the deflection measurements used to determine the structural assessment of the pavement are presented. On the example of the pavement structure condition analysis, carried out as part of the master thesis, the importance of the implementation of continuous measurement in order to determine the structural condition and assessment of the pavement structure is shown.

Key words: *deflection, pavement structure, structural bearing capacity*

1. Uvod

Gospodarenje cestama sustavni je proces održavanja i poboljšanja postojeće cestovne mreže s ciljem osiguranja kontinuiteta u odvijanju prometa na učinkovit i siguran način uz ispunjenje zahtjeva isplativosti i zaštite okoliša. To je proces kojem je cilj optimizirati sveobuhvatne značajke ponašanja cestovne mreže tijekom vremena [1]. Sustav gospodarenja kolnicima koristi pouzdane podatke o inventaru cesta (stalne fizičke karakteristike ceste) i stanju kolnika, a radi utvrđivanja ocjene stanja kolničke konstrukcije.

Ocjena stanja kolnika obuhvaća funkcionalnu ocjenu stanja kolnika kroz procjenu služnosti i sigurnosti te strukturalnu ocjenu stanja kroz određivanje strukturalnog kapaciteta kolnika [2]. Strukturalna ocjena stanja kolnika koristi se za utvrđivanje sposobnosti kolničke konstrukcije za prihvata i prijenos prometnog opterećenja, a zahtijeva detaljne podatke o debljinama slojeva kolničke konstrukcije, svojstvima ugrađenih materijala, stanju podloge i prometnom opterećenju [3]. Pojedinačni slojevi kolnika projektiraju se tako da se otporniji materijali ugrađuju na površini, preuzimaju i raspoređuju opterećenje na niže slojeve te

šire zonu opterećenja, čime se posljedično smanjuju naprezanja u nižim slojevima slabijih materijalnih karakteristika. Ponašanje asfaltnih kolnika uobičajeno se opisuje pomoću teorije elastičnosti, iako je ponašanje kolnika u stvarnosti nelinearno i viskoelastično. Međutim, primjena teorije elastičnosti opravdana je s obzirom na prirodu opterećenja koje djeluje na kolnik te strukturalne i funkcionalne zahtjeve kolnika u eksploataciji [4].

Cilj rada je prikazati uobičajene metode za proračun stanja naprezanja i deformacija u kolniku, s naglaskom na defleksiju kolnika koja je jedan od osnovnih pokazatelja strukturalnog stanja kolničke konstrukcije u sustavu gospodarenja kolnicima. U radu su opisani glavni utjecajni čimbenici na vrijednost defleksije te prevladavajuća metoda utvrđivanja vrijednosti defleksije na kolnicima u eksploataciji. Dan je pregled parametara koji se koriste za utvrđivanje strukturalnog stanja kolnika, a na primjeru izmjerenih vrijednosti defleksija na izabranom segmentu autoceste na području Republike Hrvatske prikazan je postupak strukturalne analize, na temelju koje je moguće je dati ocjenu strukturalnog stanja kolnika na ispitanjoj dionici.

2. Metode za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija

Kolnička konstrukcija višeslojni je sustav sačinjen od nekoliko slojeva različitih materijala, koji imaju različit odziv pod utjecajem opterećenja. Strukturalna nosivost kolničke konstrukcije proizlazi iz analize stanja naprezanja i deformacija u slojevima i važan je čimbenik za definiranje razdoblja eksploatacije unutar kojega konstrukcija mora zadovoljiti minimalne strukturalne zahtjeve. Za razliku od drugih konstrukcija koje imaju granično opterećenje nakon kojega više ne zadovoljavaju uvjet nosivosti, kod projektiranja ili rekonstrukcije kolničke konstrukcije važno je osigurati dovoljnu razinu usluge za korisnike cestovne infrastrukture u predviđenom vremenu eksploatacije [5].

Strukturalno stanje kolničke konstrukcije moguće je odrediti korištenjem empirijskih metoda i teorijskih modela stanja naprezanja i deformacija [5]. Empirijske metode, kakva je primjerice AASHO metoda razvijena 60-ih godina 20. stoljeća u SAD-u, uzimaju u obzir parametre definirane na prethodno izvedenim testovima gdje su uspostavljeni empirijski odnosi između ponašanja kolničke konstrukcije i utjecajnih činitelja (osovinskog opterećenja vozila, prometnog opterećenja, debljine slojeva kolničke konstrukcije, klimatskih čimbenika) [6]. Glavni nedostatak empirijskih metoda je što one ne daju uvid u stanje naprezanja i deformacija te pomaka u kolničkoj konstrukciji.

Teorijske metode za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija temelje se na načelu izračunavanja naprezanja i deformacija u konstrukciji i uzimaju

u obzir pretpostavke materijalnih svojstava slojeva kolničke konstrukcije. Nedostatak primjene teorijskih metoda dimenzioniranja je složenost kolničke konstrukcije kao dinamički opterećenog sustava sačinjenog od materijala vrlo različitih karakteristika, čije ponašanje uvelike ovisi o utjecajnim činiteljima (prometnom opterećenju, klimatskim uvjetima - temperaturi, vlazi, starosti konstrukcije itd.), što čini postupak proračuna složenijim nego kod ostalih inženjerskih konstrukcija [6].

Uzevši u obzir prednosti i nedostatke oba pristupa dimenzioniranju kolničkih konstrukcija, u praksi je uvriježeno korištenje obje metode - uobičajeno se kolničke konstrukcije najprije dimenzioniraju korištenjem empirijskih metoda uz prilagodbu ulaznih parametara stvarnim uvjetima, a tako dimenzionirana konstrukcija provjerava se korištenjem teorijskih metoda [6].

2.1. Teorijske metode određivanja strukturalne nosivosti

Teorijske metode proračuna strukturalnog stanja kolničke konstrukcije podrazumijevaju poznavanje materijalnih svojstava slojeva kolničke konstrukcije (modul elastičnosti, Poissonov koeficijent), geometriju konstrukcije i opterećenje na konstrukciju [6], a najčešće se zasnivaju na teoriji elastičnosti. Korištenjem teorije elastičnosti u proračunu strukturalnih svojstava uvode se pojednostavljenja u odnosu na stvarno stanje naprezanja i deformacija u konstrukciji, ali su ista prihvatljiva s obzirom na zahtjeve kolničke konstrukcije u eksploataciji. Metode temeljene na teoriji elastičnosti koriste se i u komercijalnim računalnim programima kojima se proračunava strukturalno stanje kolničke konstrukcije, upravo zbog prihvatljivosti pojednostavljenja koja teorija elastičnosti usvaja u takvoj analizi.

Boussinesqova teorija primjer je izračuna naprezanja, deformacija i pomaka u homogenom poluprostoru opterećenom koncentriranim opterećenjem ili kružnim opterećenjem i polazište je za izračun površinske defleksije kolničke konstrukcije [7]. Pretpostavka je kako se pod utjecajem pokretnog opterećenja u slojevima kolničke konstrukcije javljaju povratne deformacije, pa je teorija elastičnosti primjenjiva uz odabir odgovarajućeg modula elastičnosti s obzirom na stanje naprezanja, što implicira nelinearnost problema i zahtijeva upotrebu iterativnih ili aproksimacijskih metoda za određivanje stanja naprezanja i deformacija u konstrukciji.

Prikaz kolničke konstrukcije kao višeslojnog sustava znatno bolje odgovara stvarnom stanju, pa su i teorije koje se zasnivaju na proračunu naprezanja i deformacija u dvoslojnim i višeslojnim sustavima primjenjive za analizu kolničkih konstrukcija pod utjecajem osno simetričnog opterećenja. Jedna od takvih teorija je Burmisterova teorija [8], koja podrazumijeva postojanje više slojeva kolničke konstrukcije gdje je svaki

sloj homogeni, izotropni, linearno elastični materijal konačne debljine (osim zadnjeg sloja), karakteriziran zasebnim modulom elastičnosti i Poissonovim koeficijentom. Naprezanja u višeslojnim sustavima ovise o odnosu modula elastičnosti slojeva i omjerima geometrijskih veličina (debljine sloja i površine opterećenja), pa su za različite omjere ovisno o vrsti materijala i debljini sloja definirane tablice i grafovi za određivanje naprezanja, deformacija i defleksija.

Osim navedenih analitičkih metoda koje se temelje na teoriji elastičnosti, za analizu stanja naprezanja i deformacija u kolničkoj konstrukciji koriste se i numeričke metode, primjerice metoda konačnih elemenata (2D i 3D) ili metoda diskretnih elemenata [5]. Proračun stanja naprezanja i deformacija te defleksije kolničke konstrukcije pomoću numeričkih metoda daje rezultate koji su najvjerniji prikaz stvarnog odziva konstrukcije na djelovanje opterećenja jer uzimaju u obzir nelinearnost i anizotropiju materijala te raznolikost rubnih uvjeta, ali i nejednoliko djelovanje opterećenja na samu konstrukciju. S obzirom na sve proračunske parametre koje uzimaju u obzir i zahtjevnost proračuna, numeričke metode rjeđe su u komercijalnoj upotrebi, a isto vrijedi i za metode koje ponašanje kolničke konstrukcije opisuju viskozim i viskoelastičnim materijalnim modelima, što je najbliže stvarnom ponašanju kolnika.

3. Defleksija kolnika

Defleksija kolnika ili progib kolničke konstrukcije predstavlja deformaciju u obliku savijanja koja nastaje pod djelovanjem opterećenja i uobičajeni je pokazatelj strukturalnog stanja kolnika [6]. Za izračun defleksije površine kolnika polazište je Boussinesqova teorija raspodjele naprezanja, gdje je konstrukcija jednoliko opterećena, a defleksija se izračunava u centru površine opterećenja, prema izrazu (1)

$$W_{max} = \frac{p_0 * a}{E} * w^* \quad (1)$$

gdje je p_0 primijenjeno naprezanje, a je radijus naprezanja, E je Youngov modul elastičnosti materijala, w^* je konstanta defleksije [9]. Kako su savitljive kolničke konstrukcije materijali u kojima se pri opterećenju javljaju nejednolike deformacije, W_{max} predstavlja najveći iznos defleksije koji se realizira ispod centra površine opterećenja, dok se prema rubovima površine opterećenja iznos defleksije smanjuje.

Defleksija se empirijski može utvrditi ispitivanjem kolnika uređajem s padajućim teretom (FWD), što je jedna od najraširenijih nedestruktivnih metoda u procjeni strukturalnog stanja. FWD ispitivanje simulira iznos i trajanje opterećenja standardne osovine primjenjujući impulsno opterećenje. Odgovor kolnika na primijenjeno opterećenje (defleksija

kolnika) je važan ulazni podatak za ocjenu strukturalnog stanja kolnika, kao i za indikaciju preostalog uporabnog vijeka kolnika [10]. FWD uređaj generira opterećenje u trajanju 25 - 30 milisekundi te na taj način simulira pokretno opterećenje vozila. Ispitivanje se provodi spuštanjem utega (opterećenja) te prijenosa opterećenja preko ploče promjera 150 mm ili 300 mm. Odgovor kolnika (defleksija) mjeri se iz seta geofona, smještenih na odgovarajućim udaljenostima od središnje ploče opterećenja [11,12].

Ispitivanja FWD uređajem provode se na postojećim kolnicima u različitim eksploatacijskim uvjetima, što utječe na iznos izmjerene deformacije. Najveći utjecaj na vrijednost defleksije imaju temperatura, statički model opterećenja te oštećenja kolnika [4].

3.1. Temperatura

Asfalt je nelinearni viskoelastični kompozitni materijal, što znači da njegovo ponašanje ovisi o temperaturi materijala i veličini opterećenja. Zbog utjecaja temperature, u praksi se provodi korekcija izmjerene defleksije s obzirom na referentnu temperaturu. Međutim, temperaturne korekcije obično se odnose na deformabilna svojstva samo asfaltnih materijala. Temperatura ima utjecaj i na ponašanje viskoelastičnog materijala u smislu propagacije vala opterećenja. S povećanjem temperature kolnika, asfaltni slojevi ponašaju se kao viskoelastični fluid umjesto kao elastično kruto tijelo. Disipacija energije prouzrokovane impulsnim opterećenjem FWD uređaja je brža u kolnicima s većom temperaturom, što utječe na manje vrijednosti deformacije (defleksije) pri istom primijenjenom opterećenju [4].

3.2. Statički model opterećenja

Elastični statički modeli su najšire korišteni modeli za povratnu analizu i određivanje modula elastičnosti materijala izvedenih kolnika. Koncept takvih modela je da se dinamičko opterećenje, primijenjeno FWD uređajem, može relativno točno prikazati ekvivalentnim statičkim opterećenjem te da se kolnik može tretirati kao slojeviti linearni elastični poluprostor. Modeli statičkog opterećenja su prihvatljivi na kolnicima koji nemaju značajnih oštećenja. Primijenjeno opterećenje je kratkotrajno te je jedini očekivani način odgovora kolnika elastična deformacija. FWD uređaj primjenjuje kratkotrajno vršno opterećenje na kolnik, koje rezultira pojavom seizmičkih valova u kolniku (kompresijskih i posmičnih valova). U homogenom poluprostoru ovakvi valovi šire se kao prostorni kompresijski i posmični valovi. Kompresijski valovi prenose se vertikalno kroz strukturu kolnika te se, kada se približe granici beskonačnog prostora, transformiraju u površinske valove, što za posljedicu ima pojavu reflektivnog vala na površini. Vršna defleksija u donjim slojevima kolnika javlja se pri savijanju gornjih slojeva kolnika, što znači da vršna izmjerena defleksija nije jednaka

vršnoj defleksiji kolnika pri statičkom opterećenju. Različita istraživanja ukazuju da primjena statičkog opterećenja daje različite rezultate modula elastičnosti u odnosu na primjenu dinamičkog opterećenja. Međutim, primjena dinamičkih modela opterećenja i dalje se smatra složenim računskim problemom, pa je pojednostavljenje neophodno kako bi se moglo učinkovito i brzo dati rezultate ispitivanja [4].

3.3. Oštećenja kolnika

Rana istraživanja provedena na pojednostavljenim modelima povratne analize ukazuju da interpretacija FWD opterećenja kao statičkog nije ispravna u slučaju oštećenih kolnika. Posmični valovi, koji su rezultat primjene dinamičkog opterećenja, sadrže značajnu količinu energije. Površinski diskontinuiteti, kao što su pukotine, imaju značajan utjecaj na prigušenje posmičnih valova. Istraživanja pokazuju da se kod ispućalih kolnika očekuju znatno veće vrijednosti mjerenih defleksija pri istom primijenjenom opterećenju [13].

Daljnja istraživanja ukazuju da brzina reflektivnog vala, očitano na geofonima, može ukazivati na prisutnost pukotine. Brzina reflektivnog vala može se opisati zaostajanjem u vršnim defleksijama mjerenim geofonima na udaljenosti od centra primijenjenog opterećenja. Istraživanja ukazuju da u slučaju manjih pukotina, koje ne sežu cijelom dubinom sloja, iste ne utječu na vrijednost defleksije. Međutim, u slučaju otvorenih pukotina bilježi se značajna razlika u vrijednostima defleksija [14].

4. Strukturalna ocjena stanja kolnika

Od 2004. do 2007. godine u okviru COST 354 projekta provedena je sveobuhvatna analiza u svrhu definiranja jedinstvenih indikatora performansi kolnika. U istraživanju je sudjelovalo dvanaest europskih država. Kroz bazu podataka COST 354 projekta utvrđeno je 5 različitih tehničkih parametara za utvrđivanje strukturalnog stanja kolnika: defleksija, strukturalni broj, preostali uporabni vijek, E-modul te brzina prirasta defleksije. U većini zemalja, prevladavajući tehnički parametar za ocjenu strukturalnog stanja kolnika upravo je parametar defleksije [15].

Različite države utvrđuju mogućnost implementacije indeksa strukturalne nosivosti u sustav gospodarenja kolnicima na razini mreže. U okviru COST 336 projekta razvijen je standard za korištenje FWD uređaja za mjerenje defleksije u svrhu utvrđivanja strukturalnog stanja kolnika u Europi [16]. Prema zaključcima COST 336 projekta, ovisno o modelu odlučivanja za izvođenje radova rekonstrukcije i rehabilitacije kolnika, izdvojena su tri tehnička parametra za ocjenu strukturalnog stanja kolnika - centralna defleksija, strukturalni broj ili SCI faktor i defleksijska krivulja [16].

Strukturalna nosivost izvodi se iz mjerenih defleksija te se na temelju takvog parametra pokušava opisati ukupno stanje in situ kolnika. U tu svrhu razvijeni su različiti modeli kojima se pokušava opisati strukturalno stanje kolnika. Određeni modeli temelje se na vrijednostima centralne defleksije, dok se određeni modeli temelje na preostalom uporabnom vijeku kolnika dobivenom iz defleksijskih krivulja. Najčešći parametri koji se koriste pri ocjeni strukturalnog stanja ukratko su opisani u nastavku.

4.1. Indeks strukturalne sposobnosti

Indeks strukturalne sposobnosti je najranije razvijeni indeks za ocjenu strukturalnog stanja in situ kolnika. Razvijen je za ocjenu stanja iz podataka o defleksijama mjerenim Benkelmanovom gredom, iako se može prilagoditi za različite mjerne uređaje. Indeks se opisuje ocjenama 0 do 10. Maksimalna dozvoljena vrijednost defleksije ocjenjuje se vrijednošću indeksa 5, dok se ocjena 0 odnosi na najlošiji rezultat vrijednosti defleksije, a ocjena 10 na najbolji rezultat vrijednosti defleksije (najmanji iznos vrijednosti defleksije) [17].

4.2. Indeks strukturalne čvrstoće

Indeks strukturalne čvrstoće razvijen je u svrhu implementacije strukturalnih podataka u sustav gospodarenja kolnicima Prometnog odjela Teksasa. Indeks se temelji na indeksu površinske zakrivljenosti i vrijednosti defleksije izmjerene FWD uređajem na dubini 72 inča. Izračun indeksa strukturalne čvrstoće razlikuje se za tankoslojne konstrukcije i debele asfaltne kolnike. Konačni indeks strukturalne čvrstoće korigira se s obzirom na količinu oborina i prometno opterećenje [18].

4.3. Indeks strukturalnog kapaciteta

Prometni odjel Teksasa razvio je metodologiju za pretvorbu mjerenih defleksija u indeks na razini cestovne mreže, koji se temelji na efektivnoj vrijednosti strukturalnog broja kolnika. Indeks strukturalnog kapaciteta zavisao je o podacima ispitivanja defleksija FWD uređajem i ukupnoj debljini kolnika. Defleksije se ispituju pod opterećenjem 40 kN te se bilježe vrijednosti defleksija na udaljenosti 1,5 ukupne debljine kolnika. Iz navedenih podataka se putem transformacijskih jednadžbi izračunava indeks strukturalnog kapaciteta, kao i rezilijentni modul [19].

4.4. Indikator strukturalne čvrstoće

2009. godine razvijen je indikator strukturalne čvrstoće, koji je ograničen na isključivo vrijednosti defleksija mjerenih FWD uređajem. Indikator strukturalne čvrstoće koristi podatke centralnih defleksija sličnih

kolnika za razvoj funkcije temeljene na kumulativnoj raspodjeli defleksija. Cilj indikatora je dati vjerojatnost pojave veće defleksije od mjerene na sličnim kolnicima unutar cestovne mreže. Indikator se prikazuje na skali 0 do 100, gdje ocjena 0 označava loše stanje kolnika, dok ocjena 100 označava izvrsno stanje kolnika [20].

4.5. Preostali uporabni vijek

Prometni odjel Kanzasa razvio je skup regresijskih jednadžbi za određivanje preostalog uporabnog vijeka kolnika. Preostali uporabni vijek predstavlja očekivani preostali broj godina uporabljivosti kolnika u pogledu funkcionalnih i strukturalnih svojstava. Pri izračunu se koriste modeli ponašanja kolnika i vrijednost centralne defleksije mjerene FWD uređajem. Iako ove jednadžbe pokazuju dobru korelaciju s izračunima preostalog uporabnog vijeka na temelju služnosti kolnika, potrebna je daljnja razrada za kalibraciju modela predviđanja za različite kategorije cesta [10].

4.6. Indeksi temeljeni na rezultatima defleksijske krivulje

Oblik i dimenzije krivulje defleksije te odnos duljine krivulje i maksimalne vrijednosti defleksije mogu dati informaciju o strukturalnom stanju pojedinog sloja kolničke konstrukcije [21]. Na temelju krivulje defleksije mogu se procijeniti moduli elastičnosti ili krutosti pojedinih slojeva, procijeniti preostali uporabni vijek, detektirati slaba mjesta u konstrukciji i sl. Različiti oblici krivulja defleksije promatraju se s obzirom na vrijednost defleksije (D_0) i duljine krivulje defleksije (L_0) te s obzirom na svojstva kolničke konstrukcije [21].

Iz krivulje defleksija razvijeni su različiti parametri koji služe kao smjernice za procjenu strukturalnog stanja pojedinih slojeva kolničke konstrukcije. Upotreba ovih parametara je vrlo jednostavna i ne zahtjeva veću količinu ulaznih podataka, što omogućuje učinkovitu i brzu ocjenu stanja kolnika kao smjernice za procjenu čvrstoće pojedinih slojeva. Najčešći parametri koji se koriste su [22]:

- SCI (eng. surface curvature index),
- BDI (eng. base damage index), i
- BCI (eng. base curvature index).

SCI indeks predstavlja razliku centralne defleksije i defleksije mjerene na udaljenosti 300 mm (d_{300}) od centralnog opterećenja. Navedeni indeks opisuje stanje površinskih asfaltnih slojeva [22].

BDI indeks predstavlja razliku defleksije mjerene na udaljenosti 300 mm (d_{300}) i defleksije mjerene na udaljenosti 600 mm (d_{600}) od centralnog opterećenja. Navedeni indeks opisuje stanje donjih nosivih slojeva [22].

BCI indeks predstavlja razliku defleksije mjerene na udaljenosti 600 mm (d_{600}) i defleksije mjerene na udaljenosti 900 mm (d_{900}) od centralnog opterećenja. Navedeni indeks opisuje stanje podloge [22].

Indeks D_0 predstavlja nultu defleksiju, odnosno defleksiju izmjerenu ispod centralnog opterećenja.

U Tablici 1. dane su vrijednosti navedenih parametara za ocjenu strukturalnog stanja kolničke konstrukcije, prema [23].

Tablica 1. Vrijednosti parametara defleksijske krivulje [prema 23].

Indeks \ Stanje kolnika	Dobro	Zadovoljavajuće	Nezadovoljavajuće
D_0 (μm)	< 400	400 – 600	> 600
SCI (μm)	< 200	200 – 400	> 400
BDI (μm)	< 100	100 – 150	> 150
BCI (μm)	< 50	50 – 80	> 80

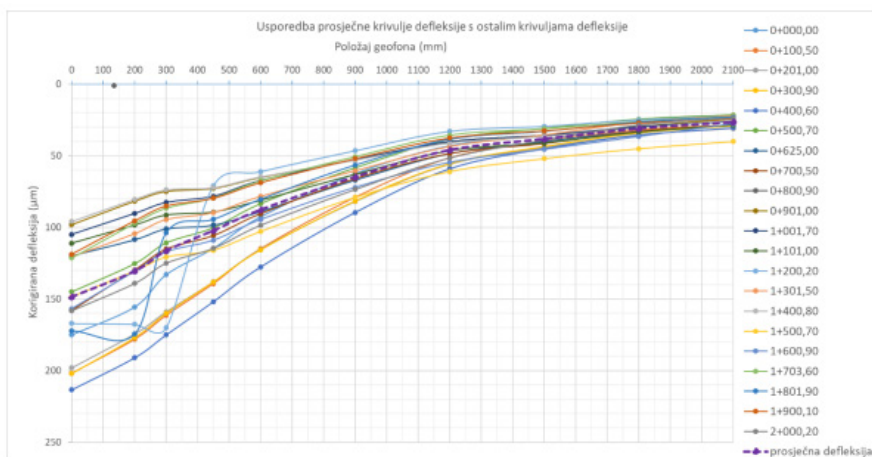
5. Primjer strukturalne analize kolnika

Strukturalna analiza kolnika provedena je u sklopu diplomskog rada na temelju izmjerenih vrijednosti defleksije na izabranom segmentu autoceste na području Republike Hrvatske. Karakteristike odabrane dionice su značajno prometno opterećenje sa većim udjelom teških teretnih vozila i homogena struktura kolničke konstrukcije budući da dionica prolazi pretežito nizinskim područjem bogatim podzemnom vodom, pa je za očekivati da su slojevi donjeg ustroja izvedeni od materijala otpornog na utjecaj vlage [21].

Mjerenje vrijednosti defleksije provedeno je FWD uređajem Laboratorija za prometnice Građevinskog fakulteta u Rijeci. Prije svakog mjerenja utvrđene su temperature relevantne za iznos defleksije – temperatura kolnika i temperatura zraka. Točke mjerenja defleksije definirane su na rasteru od 100 metara, a strukturalna analiza u ovom primjeru prikazana je za dionicu ukupne duljine 2 kilometra. Uređajem FWD defleksija se mjeri pomoću 10 geofona nakon nanošenja statičkog opterećenja od 40 kN u vanjskom kolotragu. Mjerenje je u svakoj točki provedeno dvaput, pa su konačno usvojene vrijednosti defleksije srednja vrijednost izmjerenih. Prosječne vrijednosti izmjerenih defleksija u točkama mjerenja korigirane su na referentnu temperaturu kolnika od 20°C, što je u prosjeku oko 9°C viša temperatura od prosječno izmjerenih temperatura prilikom ispitivanja. Temperaturna korekcija provedena je za

mjerenja na prvih 5 geofona (do 600 μm) budući da na većim udaljenostima temperatura nema utjecaja na izmjerene vrijednosti defleksija.

Pomoću korigiranih vrijednosti defleksije iscrtane su krivulje defleksije, prema čijem je obliku procijenjeno strukturalno stanje analizirane kolničke konstrukcije. Na Slici 1. prikazane su krivulje defleksije na svim izmjerenim stacionažama, kao i krivulja prosječne defleksije za čitav analizirani segment.



Slika 1. Krivulje defleksije na izmjerenim stacionažama i prosječna krivulja defleksije za analizirani segment, preuzeto iz [21]

Krivulja prosječne defleksije iscrtana je kao prosjek izmjerenih vrijednosti defleksije u pojedinom geofonu na svim stacionažama, prema podacima u Tablici 2.

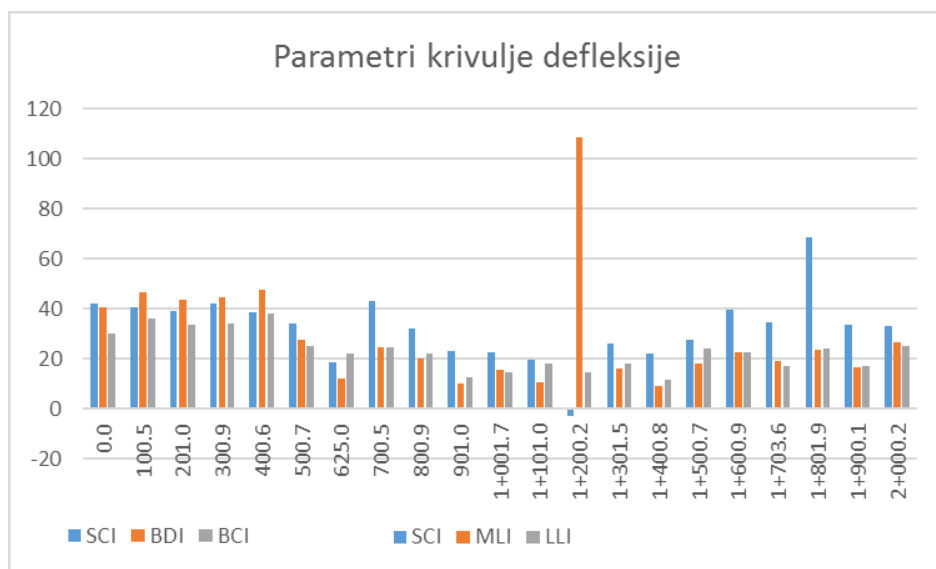
Tablica 2. Prosječne vrijednosti defleksije u pojedinom geofonu za analizirani segment, preuzeto iz [21]

Prosječna defleksija na pojedinom geofonu									
[D1 μm]	[D2 μm]	[D3 μm]	[D4 μm]	[D5 μm]	[D6 μm]	[D7 μm]	[D8 μm]	[D9 μm]	[D10 μm]
148,5738	130,5883	116,3229	102,2203	87,66877	64,66667	45,95238	38,2381	30,95238	26,45238

Usporedbom prosječnih vrijednosti defleksije prikazanih u Tablici 2 sa граниčnim vrijednostima prema Tablici 1 može se zaključiti da je generalno strukturalno stanje kolnika na analiziranoj dionici zadovoljavajuće. Na Slici 1. vidljivo je kako nijedna izmjerena nulta defleksija ne prelazi граниčnu vrijednost zadovoljavajućeg strukturalnog stanja. Oblik krivulje prosječne defleksije ukazuje da se radi o kolničkoj konstrukciji veće krutosti, što je

očekivano s obzirom na uvriježenu primjenu hidraulički stabiliziranih nosivih slojeva i asfaltnih materijala više kvalitete na hrvatskim autocestama.

Raspon vrijednosti nulte defleksije iznosi od približno 100 μm do približno 220 μm , što ukazuje na heterogenost analizirane dionice i potrebu za detaljnijom analizom onih segmenata koji imaju nešto lošije performanse. Najveće vrijednosti parametara krivulje defleksije SCI, BDI i BCI dobivene su u početnim stacionažama dionice (Slika 2.) što ukazuje na nešto lošije strukturalno stanje u odnosu na prosjek, a može biti posljedica većeg udjela teških teretnih vozila koja zbog manje brzine statički opterećuju konstrukciju. Vrijednost SCI indikatora, koja je značajno viša u odnosu na ostale vrijednosti, je ona u stacionaži 1+801,90. Razlog tome mogu biti mikropukotine koje se javljaju u asfaltu i povećavaju naprezanja u donjim slojevima konstrukcije, a time i defleksiju. Također se ističe visoka vrijednost parametra BDI u stacionaži 1+200,20, koji opisuje stanje donjeg nosivog sloja konstrukcije i indicira da je u toj stacionaži nosivi sloj konstrukcije oslabljen. S obzirom na provedenu analizu parametara krivulje defleksije, može se zaključiti kako ekstremne vrijednosti indikatora mogu ukazati na potrebu za detaljnijom analizom konstrukcije.



Slika 2. Usporedba parametara krivulje defleksije po izmjerenim stacionažama [21]

6. Zaključak

Strukturalna nosivost kolničke konstrukcije važan je element u definiranju ocjene stanja kolnika u procesu gospodarenja cestama. Elementi strukturalne nosivosti su naprezanja i deformacije koje se javljaju u konstrukciji uslijed djelovanja opterećenja, a ovise o svojstvima konstrukcije, svojstvima opterećenja te utjecajima klimatskih čimbenika, prvenstveno temperature. Naprezanja i deformacije u kolničkoj konstrukciji određuju se prema načelima teorije elastičnosti budući da je pretpostavka da se kolnička konstrukcija ponaša kao višeslojni linearno elastični sustav u kojemu su slojevi različitih materijala i različitih materijalnih karakteristika.

Empirijski se ponašanje konstrukcije pod utjecajem opterećenja može odrediti nerazornom metodom ispitivanja progiba kolničke konstrukcije – defleksije. Iz ispitivanja defleksije razvijeni su različiti indeksi kojima se dovoljno točno može opisati strukturalno stanje kolničke konstrukcije bez upotrebe teorijskih proračuna. Primjer je analiza parametara krivulje defleksije iz koje je moguće procijeniti stanje kolničke konstrukcije i detektirati mjesta na kojima je došlo do smanjenja vrijednosti parametara strukturalne nosivosti. Takva analiza provedena je u diplomskom radu, gdje je na temelju izmjerenih vrijednosti defleksije na izabranom segmentu autoceste provedena analiza indeksa koji opisuju stanje kolnika. Prosječne vrijednosti svih parametara za analiziranu dionicu bile su unutar graničnih vrijednosti. Međutim, detaljnom je analizom ustanovljeno kako su neki dijelovi kolničke konstrukcije slabijeg strukturalnog stanja. Kako bi se preciznije odredio strukturalni problem za takve dijelove konstrukcije, potrebno je provesti složeniju povratnu analizu kolničke konstrukcije nekim od specijaliziranih softvera.

Analizom svojstava kolnika koja utječu na strukturalni kapacitet (pojava naprezanja, deformacija i defleksija) mogu se pravovremeno uočiti segmenti u cestovnoj mreži sa smanjenim vrijednostima strukturalnih svojstava i sukladno tome poduzeti mjere za rehabilitaciju kolničke konstrukcije.

Zahvala. *Ovaj je članak rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.*

Literatura

- [1] Sršen, M. (2011) Terminološki četverojezični rječnik cestovnog inženjerstva sa pojmovnikom. 1. izdanje. Zagreb. Aspecta

- [2] Asphalt institute (2009) Asphalt in Pavement Preservation and Maintenance. 4th edition. Lexington, Kentucky, USA. Asphalt Institute
- [3] Park, K; Isola, R. i Ferne, B. (2008) Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition. ASCE Journal of Transportation Engineering, 706 - 709.
- [4] Huang, Y.H. (2004) Pavement Analysis and Design. 2nd edition. USA. Pearson education inc.
- [5] Ullidtz, P. (1998) Modelling Flexible Pavement Response and Performance. 1st edition. Denmark. Polyteknisk Forlag
- [6] Babić, B. (1997) Projektiranje kolničkih konstrukcija. Zagreb. Hrvatsko društvo građevinskih inženjera
- [7] Foster, C.R., Ahlvin R.G. (1954) Stresses and Deflections Induced by a Uniform Circular Load. Proc Highway Res Board, 33, 467-470
- [8] Burmister, D.M. (1943) The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways. Proc Highway Res Board, 2, 126-148
- [9] Nikolaidis, A. (2015) Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality, CRC Press, Boca Raton, USA.
- [10] Gedafa, D.; Hossain, M; Miller, R. i Van, T. (2010) Estimation of Remaining Service Life of Flexible Pavements From Surface Deflections. Journal of Transportation Engineering, 342 - 352
- [11] MACTEC engineering and consulting, Inc. (2006) LTPP manual for falling weight deflectometer measurements version 4.1. Washington DC. Federal Highway Administration
- [12] Pearson, D. (2012) Deterioration and Maintenance of Pavement. London. ICE Publishing
- [13] Uddin, W., Zhang, D. i Fernandez, F. (1994) Finite Element Simulation of Pavement Discontinuities and Dynamic Load Response. Transportation research record, 100 - 106
- [14] Nesnas, K, Isola. R. i Ferne, B. (2008) Modelling the Effect of Pavement Cracks on Falling Weight Deflectometer Measurements. Transport research laboratory
- [15] COST 354 (2007) Performance Indicators for Road Pavements WP2"Selection and assessment of individual performance indicators. COST354/WP2_Report30052008
- [16] COST 336 (2005) Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation. Final Report. 2nd Edition
- [17] Hass, R. (1994) Modern Pavement Management. Malabar. Krieger publishing company
- [18] Scullion, T. (1988) Incorporating a Structural Strength Index into the Texas Pavement Evaluation System. Austin. TX: Texas Department of Transportation

- [19] Zhang, Z.E. (2003) Development of a New Methodology for Characterizing Pavement Structure Condition for Network Level Applications. Austin. TX: Texas Department of Transportation
- [20] Flora, W. (2009) Development of Structural Index of Pavement Management: An exploratory analysis. West Lafayette. Indiana. Purdue University
- [21] Stanić, I. (2019) Analiza asfaltnih kolničkih konstrukcija na temelju mjerenih defleksija. diplomski rad
- [22] Talvik, O. i Aavik, A. (2009). Use of FWD Deflection Basin Parameters (SCI, BDI, BCI) for Pavement Condition Assessment. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4., 196 - 202.
- [23] Committee of State Road Authorities CSRA (1997) Flexible Pavement Rehabilitation Investigation and Design. Draft Technical recommendation for Highways 12. Department of Transport. Pretoria

