

Ocjena nosivosti kolnika na temelju podataka prikupljenih uređajem s padajućim teretom

Kovačić, Leon

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:649347>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Leon Kovačić

OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA TEMELJU
PODATAKA PRIKUPLJENIH UREĐAJEM S
PADAJUĆIM TERETOM

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Leon Kovačić

ASSESSMENT OF THE PAVEMENT BEARING
CAPACITY BASED ON THE DATA COLLECTED
WITH THE FWD

MASTER THESIS

izv. prof. dr. sc. Josipa Domitrović

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Leon Kovačić

OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA TEMELJU
PODATAKA PRIKUPLJENIH UREĐAJEM S
PADAJUĆIM TERETOM

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Josipa Domitrović

Zagreb, 2025.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Leon Kovačić

(Ime i prezime)

0066280138

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

Ocjena nosivosti kolnika na temelju podataka prikupljenih uređajem s padajućim teretom

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

Assessment of the pavement bearing capacity based on the data collected with the FWD

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

18.02.2025.

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Josipa Domitrović

Potpis mentora:

Komentor:



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

LEON KOVAČIĆ, 0066280138

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA TEMELJU PODATAKA PRIKUPLJENIH UREĐAJEM SA PADAJUĆIM TERETOM

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

18.02.2025

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja:

LEON KOVAČIĆ, 32355685192

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA TEMELJU PODATAKA PRIKUPLJENIH UREĐAJEM SA PDAJUĆIM TERETOM

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

JOSIPA DOMITROVIĆ

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.2.2025

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

16.02.2025

Potpis:

ZAHVALE

Hvala cijeloj mojoj obitelji (posebno tati, mami, Lovri i baki) zato što (uglavnom) vjeruju u mene i sve što mogu postići. Bez vas ne bih bio tu gdje sam danas.

Hvala mojoj Dorotei, za strpljenje i ljubav, a najviše joj hvala što je bila najnaporniji zagovornik toga da svoje studiranje napokon privedem kraju.

Hvala izv.prof.dr.sc. Josipi Domitrović na mentorstvu, ukazanom povjerenju i svemu što me naučila tijekom studija, kao i profesorici Tatjani Rukavini na pomoći prilikom izrade ovog rada. Hvala objema na svim pruženim prilikama.

Hvala Vam svima od srca!

SAŽETAK

Rad detaljno prikazuje metodologiju mjerenja nosivosti kolnika koristeći uređaj s padajućim teretom, koji je jedan od najraširenijih nerazornih alata za procjenu strukturalnog stanja kolnika. Korištenje ovog uređaja omogućuje precizno određivanje nosivosti bez potrebe za destruktivnim ispitivanjima, što je od posebne važnosti za održavanje i planiranje obnove prometnica. Prikazane su i metode izračunavanja nosivosti kolnika na temelju dobivenih vrijednosti defleksija te postupci za određivanje modula elastičnosti materijala, što su ključni parametri u procjeni dugoročne izdržljivosti kolnika.

Praktična primjena ovih metoda ilustrirana je na primjeru konkretne dionice autoceste A2 (Zagreb – Macelj), čime se pruža uvid u stvarne izazove i rješenja u cestogradnji i održavanju prometnica. Cilj rada je ne samo pružiti teorijsku analizu nosivosti kolnika, već i ponuditi konkretne smjernice i preporuke za inženjere i stručnjake u području cestovne infrastrukture, s ciljem poboljšanja učinkovitosti održavanja i sigurnosti cestovnog prometa.

KLJUČNE RIJEČI: nosivost, defleksije, modul elastičnosti, uređaj s padajućim teretom, metoda povratnih analiza

SUMMARY

This thesis provides a detailed overview of the methodology for measuring pavement bearing capacity using a falling weight deflectometer (FWD), one of the most widely used non-destructive tools for assessing the structural condition of pavements. The use of this device enables precise determination of bearing capacity without the need for destructive testing, which is particularly important for road maintenance and rehabilitation planning.

The study also outlines methods for calculating pavement bearing capacity based on measured deflection values and procedures for determining the elastic modulus of materials—key parameters for evaluating the long-term durability of pavements.

The practical application of these methods is illustrated through a case study on a specific section of the A2 motorway (Zagreb–Macelj), offering insights into real-world challenges and solutions in road construction and maintenance. The objective of this thesis is not only to provide a theoretical analysis of pavement bearing capacity but also to deliver concrete guidelines and recommendations for engineers and professionals in the field of road infrastructure, aiming to enhance maintenance efficiency and traffic safety.

KEY WORDS: bearing capacity, deflections, elastic modulus, falling weight deflectometer, backcalculation analysis

POPIS SLIKA

Slika 1 Algoritam sustava gospodarenja kolnicima (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).....	2
Slika 2 Kategorije održavanja (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).....	4
Slika 3 Funkcije i svojstva kolnika ovisno o vrsti ocjene stanja (preuzeto iz Rukavina i Ožbolt, 2009).....	8
Slika 4 Defleksija (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).....	10
Slika 5 Elementi defleksijskog bazena (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).....	11
Slika 6 Početno sučelje programa (izradio autor).....	17
Slika 7 Otvaranje novog projekta u programu (izradio autor).....	17
Slika 8 Odabir odgovarajuće datoteke (izradio autor).....	18
Slika 9 Opcije programa (izradio autor).....	19
Slika 10 Prikaz ključnih informacija mjerenja (izradio autor).....	20
Slika 11 Unos podataka u program (izradio autor).....	21
Slika 12 Početak povratne analize (izradio autor).....	22
Slika 13 Odabir MET analize (izradio autor).....	22
Slika 14 Početak obrade podataka (izradio autor).....	23
Slika 15 Popravak smještaja geofona (izradio autor).....	23
Slika 16 Prostor za aktivaciju geofona (izradio autor).....	24
Slika 17 Dijagram dobivenih rezultata (izradio autor).....	25
Slika 18 Izvoz podataka u Excel (izradio autor).....	26
Slika 19 Odabir vrste podataka za izvoz (izradio autor).....	26
Slika 20 Dijagram površinskih modula (izradio autor).....	27
Slika 21 Kopiranje grafa u međuspremnik (izradio autor).....	28
Slika 22 Prima 100 (preuzeto s https://www.impact-test.co.uk/products/5472-prima-100-portable-falling-weight-deflectometer/).....	32
Slika 23 Uređaj s padajućim teretom montiran na prikolicu (preuzeto iz Rukavina, 2017).....	32
Slika 24 Uređaj s padajućim teretom ugrađen u vozilo (preuzeto iz Rukavina, 2017).....	33
Slika 25 Princip rada uređaja (preuzeto iz Rukavina i Ožbolt, 2009).....	34
Slika 26 Geofoni (preuzeto iz Rukavina, 2017).....	34
Slika 27 Geofoni (preuzeto iz Rukavina, 2014).....	34
Slika 28 Uzorkovanje kolnika 1 (preuzeto iz Rukavina, 2014).....	40
Slika 29 Uzorkovanje kolnika 2 (preuzeto iz Rukavina, 2014).....	40
Slika 30- Površinski moduli elastičnosti za asfaltni sloj (izradio autor).....	43
Slika 31 - Površinski moduli elastičnosti za CNS (izradio autor).....	43
Slika 32 Površinski moduli elastičnosti za MNS (izradio autor).....	44

Slika 33 - Površinski moduli elastičnosti za posteljicu (izradio autor).....	44
Slika 34- Ocjena strukturalnog stanja asfaltnog sloja (izradio autor)	47
Slika 35 Ocjena strukturalnog stanja CNS-a (izradio autor).....	47
Slika 36 Ocjena strukturalnog stanja MNS-a (izradio autor).....	48
Slika 37 Ocjena strukturalnog stanja posteljice (izradio autor)	48
Slika 38 Usporedba ocjene stanja kolnika za asfaltni sloj (izradio autor)	49
Slika 39 Usporedba ocjene stanja kolnika za CNS (izradio autor).....	50
Slika 40 Usporedba ocjene stanja kolnika za MNS (izradio autor).....	51
Slika 41 Usporedba ocjene stanja kolnika za posteljicu (izradio autor).....	52

POPIS TABLICA

Tablica 1 Parametri određivanja stanja kolnika prema ASFiNAG-u (izradio autor).....	16
Tablica 2 Granične vrijednosti ocjenjivanja slojeva kolnika (preuzeto iz Horak, 2008)	30
Tablica 3 Dobivene vrijednosti o strukturnom stanju kolnika (izradio autor)	42
Tablica 4 Izračun ocjene strukturalnog stanja za defleksije izmjerene u padu 3 (izradio autor)	46

SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
POPIS SLIKA	iv
POPIS TABLICA.....	v
SADRŽAJ.....	vi
1. UVOD.....	1
2. SUSTAV GOSPODARENJA KOLNICIMA	2
3. NOSIVOST KOLNIKA.....	7
3.1. Iskazivanje nosivosti kroz vrijednosti defleksije	9
3.2. Teorijski pristup	12
3.3. Empirijski pristup.....	14
3.4. Metode ocjene nosivosti kolničke konstrukcije	14
3.4.1. Metoda povratnih analiza.....	15
3.4.2. Metoda indeksa nosivosti.....	28
4. UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM	31
4.1. Podjela uređaja	31
4.2. Princip rada uređaja.....	33
4.3. Provođenje ispitivanja.....	35
4.4. Analiza podataka dobivenih uređajem	36
4.5. Prednosti korištenja uređaja.....	36
5. OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA PRIMJERU DIONICE AUTOCESTE A2	38
5.1. Prikupljanje podataka	39
5.2. Ocjena strukturalnog stanja na temelju vrijednosti modula	41
5.3. Ocjena strukturalnog stanja na temelju vrijednosti indeksa nosivosti.....	45
5.4. Usporedba ocjene stanja kolnika prema različitim metodama.....	50
6. ZAKLJUČAK	53

LITERATURA.....	54
PRILOZI.....	57

1. UVOD

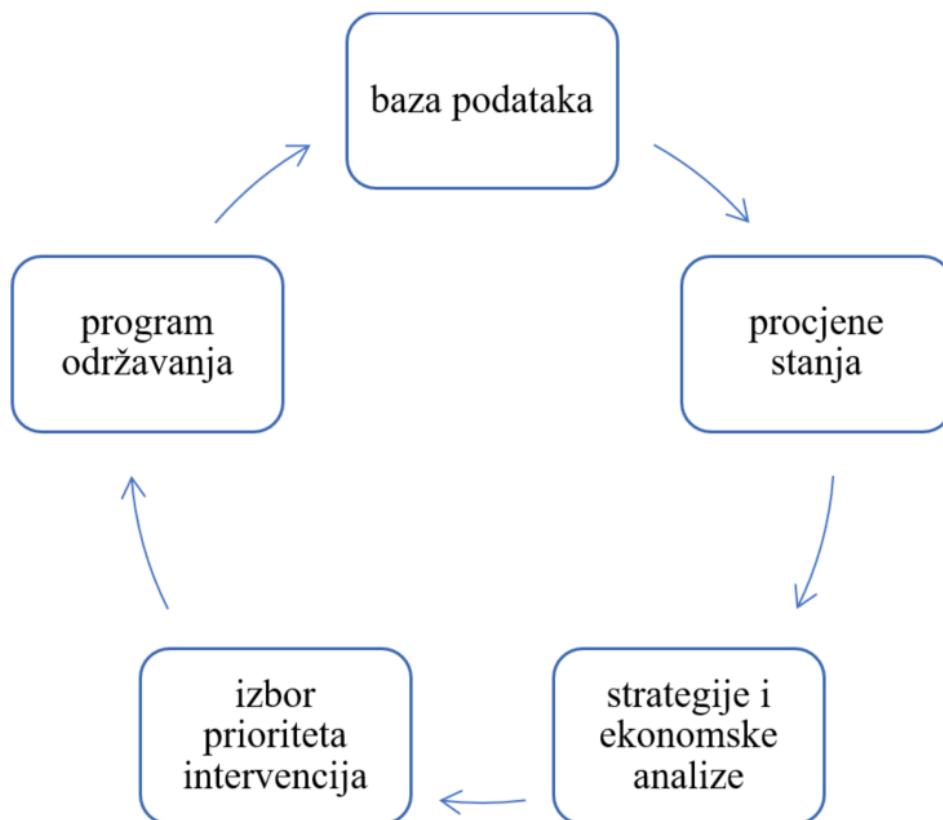
Kolnici su danas ključni elementi prometne infrastrukture, čija je upotreba porasla s globalnom urbanizacijom i rastom populacije. Intenziviranje prometa, posebno u urbanim područjima, rezultira povećanim opterećenjem i potrebom za redovitim održavanjem i proširenjem cestovnih mreža. Ocjena stanja kolnika, kao jedan od najnaprednijih sektora cestovne industrije, obuhvaća metode za procjenu stanja i izvedbe kolničkih konstrukcija. Podaci dobiveni ocjenjivanjem stanja kolnika pomažu inženjerima u donošenju odluka o intervencijama, održavanju i poboljšanju cestovne infrastrukture. Kvalitetno ocjenjivanje stanja kolnika može produžiti vijek trajanja cesta i poboljšati sigurnost prometa. Ključni problem u ovom kontekstu je utvrđivanje nosivosti kolničke konstrukcije, koja se odnosi na sposobnost konstrukcije da preuzme i prenese opterećenje na tlo, bez štetnog utjecaja na kolnik, unatoč različitim klimatskim uvjetima. U ovom radu bit će detaljno prikazana metodologija mjerenja nosivosti kolničkih konstrukcija koristeći uređaj s padajućim teretom, jedan od najraširenijih nerazornih instrumenata za procjenu strukturalnog stanja kolnika. Ovaj uređaj omogućuje precizno određivanje nosivosti kolnika bez potrebe za destruktivnim ispitivanjima, što je od ključne važnosti za održavanje i planiranje obnove prometnica.

Nadalje, bit će opisane metode izračunavanja nosivosti kolnika na temelju vrijednosti defleksija, koje se dobivaju primjenom uređaja s padajućim teretom. Također, bit će objašnjeni postupci za određivanje modula elastičnosti, što je važan parametar u procjeni dugoročne izdržljivosti kolnika.

Cilj ovog diplomskog rada je pružiti temeljitu i sveobuhvatnu analizu nosivosti kolnika primjenom različitih metoda proračuna. Posebna pažnja bit će posvećena praktičnoj primjeni tih metoda na primjeru konkretne dionice autoceste A2 (Zagreb – Macelj). Na ovaj način, rad će doprinijeti boljem razumijevanju tehničkih aspekata i izazova u procjeni nosivosti kolnika, te pružiti korisne smjernice za inženjere i stručnjake u području cestogradnje i održavanja prometnica.

2. SUSTAV GOSPODARENJA KOLNICIMA

Krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća, prvi se put spominje sustav gospodarenja kolnicima (eng. *Pavement Management System*) – sustav usklađenih aktivnosti održavanja kolnika koji za cilj ima postići najbolju moguću iskoristivost resursa kroz prikupljanje i praćenje podataka te ocjenjivanje stanja kolnika (Rukavina i Ožbolt, 2009; Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016). Osnovna funkcija kolnika je osiguranje sigurnog, učinkovitog i udobnog odvijanja prometa. Osnovne funkcije sustava gospodarenja kolnicima uključuju izrađivanje baze cestovnih podataka, procjenu dobivenih podataka i, sukladno tome, izbor najučinkovitijih strategija za održavanje, procjene troškova te razvijanje modela koji služi predviđanju mogućih oštećenja kolnika (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016). Algoritam istih autora slikovito je prikazan niže (Slika 1). Cestovni promet ključna je komponenta gospodarskog i društvenog razvoja zemlje, a njegovim se najvrjednijim dijelom smatra upravo kolnik. Navedeno je, prema Rukavina i Ožbolt (2009), razlog zašto se potrebno dodatno posvetiti sustavu gospodarenja kolnicima unutar sustava gospodarenja cestovnim građevinama.



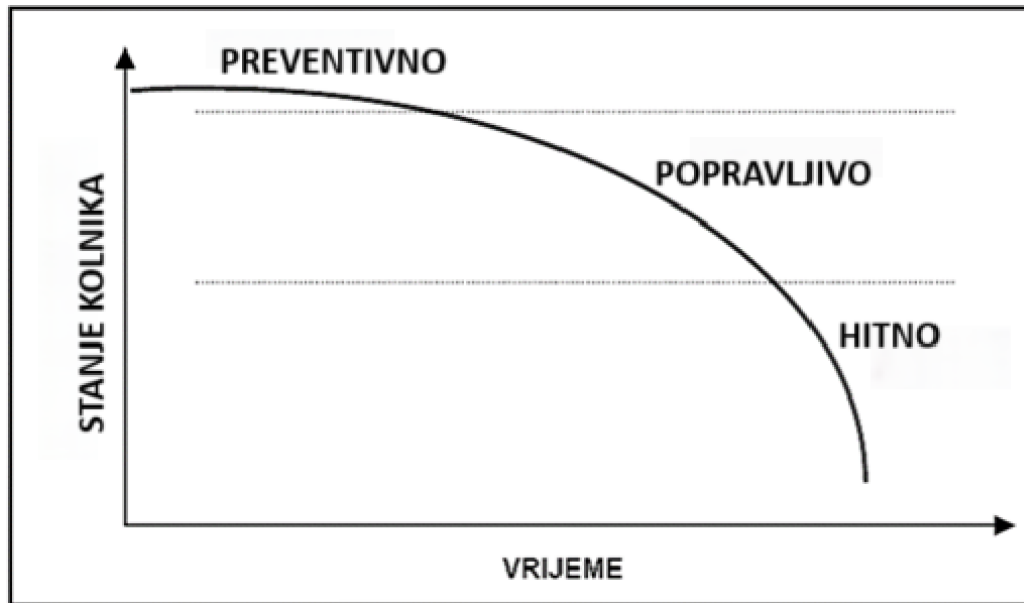
Slika 1 Algoritam sustava gospodarenja kolnicima (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016)

Sustav gospodarenja kolnicima je, prema Keller, (2009):

koordinirani skup aktivnosti usmjerenih na postizanje najbolje moguće vrijednosti za dostupna financijska sredstva kojim se omogućava siguran, udoban i ekonomičan prijevoz. To je integralan pristup očuvanju kolnika, koji uključuje: stanje cestovnih kolnika, analize, modele, ograničenje financija, političke realnosti i kombinira ih u izbalansiran program održavanja kolnika. (str. 54)

Uzme li se u obzir činjenica da je cestovna mreža danas u većini zemalja svijeta već izgrađena, jasno je zašto se fokus mora premjestiti s izgradnje kolnika na njihovo održavanje. Kolničke konstrukcije su, kao i ostali građevinski objekti, podložne djelovanju vremena. Točnije, s vremenom, a uslijed djelovanja opterećenja i raznih klimatsko-meteoroloških uvjeta, dolazi do smanjenja strukturne čvrstoće materijala koji sačinjavaju samu konstrukciju, a uslijed toga i pojave defleksija i pukotina, opadanja ravnosti, koeficijenta trenja i slično. Zaključuje se kako bi se veći naglasak trebao staviti na produženje vijeka trajanja postojećih infrastruktura nego na izgradnju novih konstrukcija. Rukavina i Ožbolt (2009) navode kako se u posljednjih dvadeset godina uočava problem da ono što se dosad znalo o održavanju kolnika više nije dostatno. Iz tog se razloga javlja potreba za primjenom novih postupaka i metoda u okviru sustava gospodarenja kolnicima. Čak i naizgled mala ulaganja u održavanje cestovne infrastrukture, prema Keller (2009), mogu rezultirati velikim gospodarskim koristima, primarno smanjenjem troškova cestovnog prijevoza. Isti autor aktivnost održavanja objašnjava kao proces – trajnu aktivnost bez definiranog početka ili kraja. Navodi kako održavanje kolničkih konstrukcija ima mnoge prednosti, kao što su povećanje sigurnosti sudionika u prometu, smanjenje stupnja propadanja kolnika, smanjenje pogonskih troškova vozila, a naglašava i pozitivan utjecaj na okoliš. Možda rezultati održavanja nisu odmah vidljivi, ali utjecaj redovitog održavanja ima dugoročne pozitivne posljedice.

Podzer, Mazić i Mihajlović (2016) definirali su održavanje kolničkih konstrukcija kao krovni pojam koji uključuje skup inženjerskih mjera koje se poduzimaju s ciljem očuvanja i poboljšanja upotrebljivosti kolničke konstrukcije. Isti autori održavanje kolničkih konstrukcija dijele u tri kategorije, kao što je prikazano Slikom 2.



Slika 2 Kategorije održavanja (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016)

Preventivno održavanje odnosi se na strateški pristup održavanju postojećeg sustava kolnika kojim se radi na usporavanju pojave budućih oštećenja. Ključne faze programa preventivnog održavanja, prema Podzer, Mazić i Mihajlović (2016), uključuju nekoliko važnih koraka. Prvi korak odnosi se na odabir dionice cestovne mreže na kojoj je potrebno provesti preventivno održavanje. Nakon toga, potrebno je identificirati vrstu problema, odnosno oštećenja koja bi mogla biti prisutna na toj dionici. Sljedeći korak je određivanje optimalne mjere održavanja koja će se primijeniti kako bi se eventualni problem riješio. Također, važno je planirati vrijeme kada će se ta tehnička mjera provesti kako bi se postigao najbolji mogući učinak. Nakon što se navedeno provede, potrebno je uspostaviti sustav monitoringa kako bi se pratili rezultati provedene mjere i osiguralo da su svi prethodni ciljevi uistinu i postignuti.

Da bi program preventivnog održavanja bio uspješan, potrebno je uspostaviti sustav edukacije za upravljačke strukture kao i za terenske radnike koji provode preventivno održavanje. Također treba prihvatiti i filozofiju da ulaganje u preventivno održavanje dugoročno donosi bolje rezultate i veće koristi. Važno je uspostaviti sustav pravovremenog djelovanja, odnosno provoditi mjere preventivnog održavanja i prije nego što se potencijalno naruši strukturalna nosivost kolnika. Konačno, nužno je osigurati stalnu financijsku potporu kako bi se program mogao kontinuirano provoditi.

Ipak, problemi s preventivnim održavanjem su neizbježni, posebno kada su budžeti za godišnje održavanje fiksni i usmjereni na rekonstrukcije i neke druge tekuće aktivnosti. Rezultati preventivnog održavanja nisu odmah vidljivi, što znači da se sredstva, posebno

financijska, predviđena za ove aktivnosti lako smanjuju ili potpuno ukidaju, čime se stvara dodatni izazov za uspješno provođenje programa.

Korektivno održavanje iduća je kategorija održavanja kolnika. Razlikuje se od preventivnog održavanja u pogledu vremena provedbe i troškova. Naime, preventivne mjere primjenjuju se dok je kolnička konstrukcija još uvijek u dobrom stanju, a korektivne mjere provode se tek kada su već zabilježena oštećenja koja zahtijevaju odgovarajuće tretiranje. Ako se tehničke mjere preventivnog održavanja ne provedu pravovremeno, jasno je da može doći do deterioracije stanja kolničke konstrukcije, što rezultira većim oštećenjima na kolniku. To, pak, povećava opseg korektivnog održavanja koje je potrebno provesti kako bi se otklonile nastale štete.

Autori (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016) kao treću kategoriju održavanja kolnika navode izvanredno, odnosno hitno održavanje. Ono se odnosi na mjere koje se provode u izvanrednim situacijama, odnosno kada je potrebno odmah reagirati na nastala oštećenja kako bi se što brže uspostavio promet ili poboljšala sigurnost. U takvim slučajevima, ključna je brzina reakcije i provedba tehničkih mjera održavanja, dok su financijska sredstva sekundarna. Zbog toga je glavni nedostatak izvanrednog održavanja često upravo nedostatak planiranih financijskih sredstava za ovu namjenu.

Sustav gospodarenja kolnicima može se podijeliti na dva dijela – onaj koji djeluje na razini cijele postojeće cestovne mreže i onaj koji djeluje na razini određenog projekta. Glavni je zadatak sustava, u oba slučaja, maksimalno iskoristiti uložena novčana sredstva (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016). Naime, kada se radi o sustavu upravljanja na razini cestovne mreže, ključno je odabrati postupke koji će ostvariti najpovoljnije efekte ulaganja. Kada se radi o sustavu na razini projekta, stručnjaci se uglavnom usredotočuju na detaljnija razmatranja vezana za održavanje te također odabiru postupke koji će biti financijski najisplativiji.

Kako bi sustav gospodarenja kolnicima, odnosno njegov dio koji se odnosi na održavanje kolnika, mogao funkcionirati, potrebno je dobro poznavati strukturalno i funkcionalno stanje kolnika, i to od trenutka kada je sama cesta puštena u promet, do trenutka u kojem je kolnik pod promatranjem zbog održavanja. Posjedovanje navedenih podataka pomaže inženjerima prilikom ocjenjivanja strukturalnog stanja kolnika te prilikom predviđanja ponašanja kolnika u budućnosti, s obzirom na opterećenje koje prelazi preko njega. Naime, prometno opterećenje izravno utječe na brzinu oštećivanja kolnika, stoga su podatci o njegovom opsegu i strukturi od velike važnosti za sustav gospodarenja kolnicima (Rukavina i Ožbolt, 2009).

Preduvjet donošenja utemeljenih odluka o održavanju kolnika je prikupljanje relevantnih podataka o strukturi, odnosno o cjelokupnom stanju kolnika. Dobiveni podaci osnovica su za donošenje informiranih odluka, međutim, autori spominju nekoliko pravila kojih se treba pridržavati prilikom donošenja odluke o prikupljanju podataka o stanju kolnika (Keller, 2009; Rukavina i Ožbolt 2009):

1. Treba prikupljati samo one podatke koji su potrebni i to samo onda kada su potrebni.
2. Treba prikupljati najmanju moguću razinu podataka potrebnu za donošenje odluke (minimalizacija prikupljenih podataka).
3. Treba razmotriti ukupni trošak prikupljanja podataka, s obzirom na to da moraju biti često obnavljani.
4. Treba koristiti pilot-studije za utvrđivanje primjerenosti pristupa prilikom prikupljanja podataka.

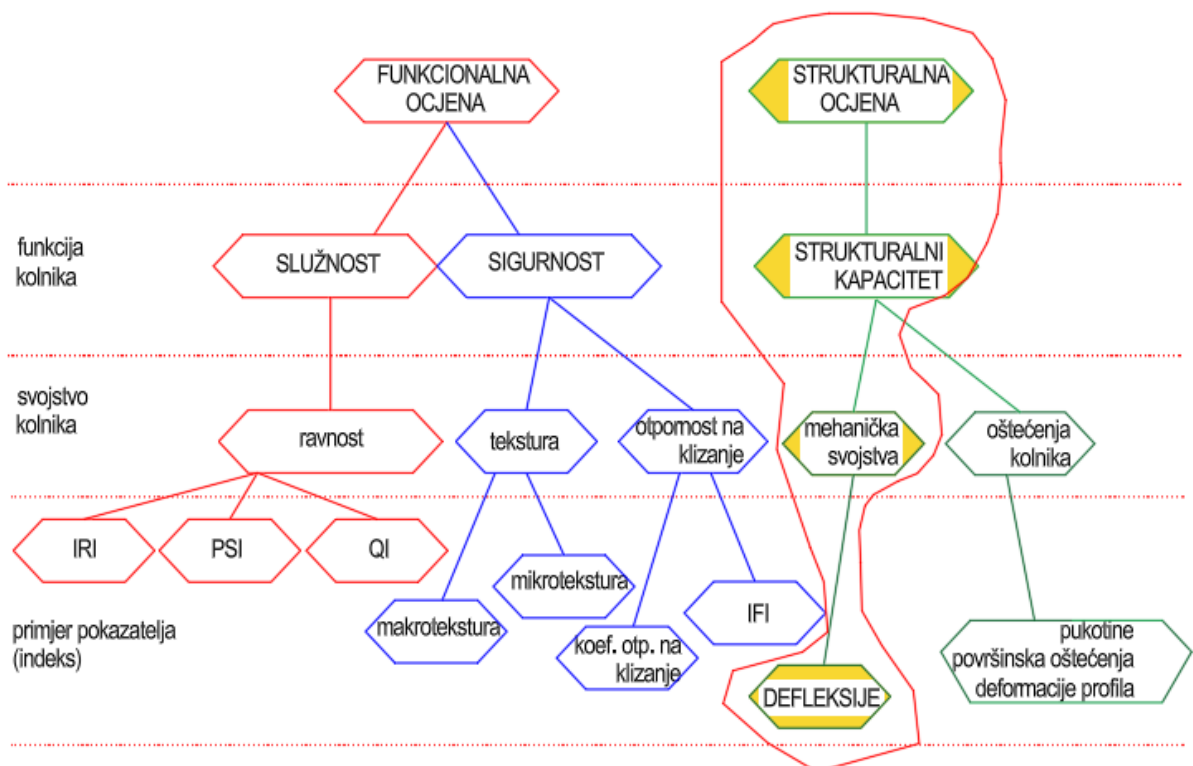
U zemljama Europske unije, podaci koji se najčešće prikupljaju za sustav gospodarenja kolnicima, a opisuju stanje ceste su: kolotrazi, neravnost, hvatljivost, defleksije i pukotine. U ovom će se radu detaljnije objasniti prikupljanje podataka o defleksiji kolničkih konstrukcija, kroz koju se daje ocjena nosivosti, odnosno strukturne čvrstoće same konstrukcije.

3. NOSIVOST KOLNIKA

Kolničke konstrukcije predstavljaju složene sustave sastavljene od slojeva koji zajedno osiguravaju čvrstu i stabilnu podlogu za odvijanje prometa. Svaka kolnička konstrukcija mora biti izvedena s odgovarajućim strukturalnim kapacitetom kako bi mogla podnijeti opterećenje koje joj predstavlja svakodnevno odvijanje prometa. Sposobnost kolničke konstrukcije da podnese i distribuira težinu vozila koja ju koriste, bez nastanka oštećenja ili deformacija, naziva se nosivost kolnika. Rukavina (2017) kaže da je nosivost zbroj pozitivnih karakteristika koje sam kolnik čine sposobnim da preuzme i prenese određeno opterećenje, bez obzira na različite klimatske uvjete te bez većih štetnih djelovanja na samu izvedbu kolnika koja se primarno odnosi na udobnost tijekom vožnje. Prema Keller (2009), nosivost nije karakteristika bitna za sam promet, jer ju korisnici cesta ne uočavaju, ali je ključna informacija za inženjere koji rade na održavanju. Nadalje, niska nosivost kolničke konstrukcije predstavlja problem inženjerima jer se u tom slučaju na cesti pojavljuju pukotine te može doći do promjene ravnosti. Posljedice takvih oštećenja su brzo propadanje oštećenih cesta, što je loše s financijskog aspekta, te uvođenje restrikcija prometa, što se loše reflektira na korisnike cesta.

S obzirom na složenost građe kolničke konstrukcije te na veliki broj čimbenika koji utječu na nosivost, ona se ne može utvrditi samo jednom metodom ispitivanja. Naime, kada se utvrđuje nosivost kolničke konstrukcije, istovremeno se koristi nekoliko metoda kako bi se dobila ocjena strukturalnog stanja kolnika (Rukavina, 2017). Ocjena strukturalnog stanja kolnika donosi se temelju podataka koji su prikupljeni o onim svojstvima kolnika koji opisuju njegovo ponašanje. S obzirom na karakteristiku koja se promatra, mjeri i čiji se podaci analiziraju, ocjena kolnika može se klasificirati kao funkcionalna ili strukturalna (Rukavina i Ožbolt, 2009), kao što je prikazano Slikom 3. Dakle, funkcionalna ocjena stanja kolnika pruža uvid u neka površinska svojstva kolnika, kao što su ravnost, tekstura i hvatljivost, odnosno otpornost na klizanje. Strukturalna ocjena kolnika pruža uvid u to kako se sama konstrukcija ponaša uslijed djelovanja prometa i uvjeta okoline. Ocjena strukturalnog stanja kolnika daje informaciju o kapacitetu te ukupnoj nosivosti kolničke konstrukcije, odnosno mogućnosti da kolnik ima zadovoljavajuću izvedbu uz minimalnu pojavu deformacija i oštećenja. Navedeno uključuje analizu materijala koji čine različite slojeve kolnika, kao i njihove međusobne interakcije pod opterećenjem. Kvaliteta i debljina slojeva igraju ključnu ulogu u određivanju ukupne strukturalne nosivosti kolnika. Kako bi se mogla donijeti ocjena o strukturalnom stanju kolnika, potrebno je promatrati oštećenja na kolniku te mehanička, odnosno strukturalna svojstva konstrukcije. Naime, cjelokupno mehaničko ponašanje

materijala, kao i mnoga njegova tehnološka svojstva, uglavnom su određeni upravo njegovim mehaničkim svojstvima. U nastavku ovog rada bit će detaljnije objašnjena vrijednost defleksije, koja je, kao što se može iščitati iz Slike 3, glavni pokazatelj mehaničkih svojstava konstrukcije. Mehanička svojstva kolničkih konstrukcija uključuju još i modul elastičnosti, svojstva zamora materijala, uvjete deformacija te preostala vlačna naprezanja (Rukavina, 2017; Rukavina i Ožbolt, 2009).



Slika 3 Funkcije i svojstva kolnika ovisno o vrsti ocjene stanja (preuzeto iz Rukavina i Ožbolt, 2009)

Navedeni parametri mogu se vrednovati vizualnim pregledom stanja kolnika te nerazornim i razornim ispitivanjima, koja se mogu podijeliti i na laboratorijska i terenska ispitivanja (Rukavina 2017; Rukavina i Ožbolt, 2009).

Jezgrovanje, odnosno ispitivanje jezgara izvađenih iz kolnika, uobičajena je razorna, odnosno laboratorijska metoda ispitivanja. Uz nju se često spominju i bušenje te iskop sondažnih jama. Razorne metode ispitivanja one su metode čijim se korištenjem oštećuje površina kolnika. Iz tog se razloga nastoji smanjiti broj i potreba za provođenjem ovakvih ispitivanja, te se stručnjaci više okreću nerazornim metodama.

Nerazorne metode ispitivanja kolnika uključuju tehnike koje omogućuju ocjenu stanja i karakteristika kolnika bez da se nanosi šteta ili nekakve trajne promjene na ispitivanom materijalu. Ta su ispitivanja uglavnom terenska. Prednost ovih metoda je u tome što omogućuju redovitu i učinkovitu kontrolu kvalitete kolnika, bez potrebe za skupim ili dugotrajnim popravcima ili zatvaranjem dionice kolnika. Upravo je ocjena nosivosti kolnika, između ostalog, jedna od vrsti nerazornih ispitivanja (Rukavina i Ožbolt, 2009). U literaturi je moguće pronaći mnogo metoda nerazornih ispitivanja, kao što su ultrazvučno ispitivanje, termografsko snimanje ili snimanje georadarom, razne spektroskopske metode, lasersko profiliranje, mjerenje deflektometrom ili uređajem s padajućim teretom, o kojemu će više riječi biti u nastavku rada. Sve nerazorne metode ispitivanja nosivosti kolničkih konstrukcija, prema Rukavina (2017), daju uvid u njihova mehanička svojstva te ocjenjuju stanje kolnika kroz defleksiju.

3.1. Iskazivanje nosivosti kroz vrijednosti defleksije

Defleksija predstavlja elastičnu deformaciju kolničke konstrukcije pod djelovanjem statičnog ili dinamičkog opterećenja na površinu (Rukavina, 2017). Odgovor je kolničke konstrukcije na opterećenje kojemu je izložena. Osim opterećenja, defleksija ovisi i o debljini pojedinih slojeva kolnika, fizičko-mehaničkim i reološkim karakteristikama materijala koji se nalaze u strukturi konstrukcije te klimatsko-meteorološkim i ostalim okolinskim uvjetima (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016). Rukavina (2017) s druge strane, izdvaja stanje i tip same kolničke konstrukcije, temperaturu okoline i vrstu primijenjenog opterećenja kao primarne faktore o kojima ovisi defleksija. Ona je, prema Cuculić, Pranjic, Deluka-Tibljaš i Stanić (2020) jedan od najvažnijih pokazatelja strukturalne nosivosti kolnika te je važan za procjenu preostalog uporabnog vijeka kolnika. Naziva se još i progibom kolničke konstrukcije (Cuculić i sur., 2020) te omogućava inženjerima da procijene koliko se kolnik deformira pod opterećenjem, što je direktno povezano s njegovom sposobnošću da izdrži prometna opterećenja bez trajnog oštećenja.

Nosivost kolničke konstrukcije obrnuto je proporcionalna defleksiji - manja defleksija ukazuje na veću nosivost i bolju kvalitetu kolnika, dok veća defleksija može signalizirati potencijalne probleme poput pukotina, udarnih rupa i drugih vrsta oštećenja. Detaljnije, kada je konstrukcija ispravno izvedena i projektirana, defleksija nije velika te ima skoro elastični karakter jer se uslijed rasterećenja konstrukcije ona vraća u svoj originalni, nedeformirani oblik. Suprotno tome, kada su u pitanju slabiji, dotrajali kolnici ili oni koji su

loše izvedeni, defleksija bude znatno veća jer se uslijed rasterećenja kolnika vraća samo dio deformacije. Rukavina (2017) objašnjava kako u tom slučaju dio deformacije ostaje i to se naziva plastičnom defleksijom, dok se tek jedan dio vraća u prvobitni oblik, što se naziva elastičnom defleksijom. Važno je razumjeti kako i vrijeme igra veliku ulogu u razumijevanju defleksije kolnika. Naime, u prvim godinama korištenja, dok je kolnik još nov, defleksija ima elastični karakter te se kolnička konstrukcija puno lakše nakon opterećenja vraća u prvobitni položaj. S odmakom vremena defleksija sve više poprima plastični karakter, stoga se nakon opterećenja zadržava određeni stupanj deformacije (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).

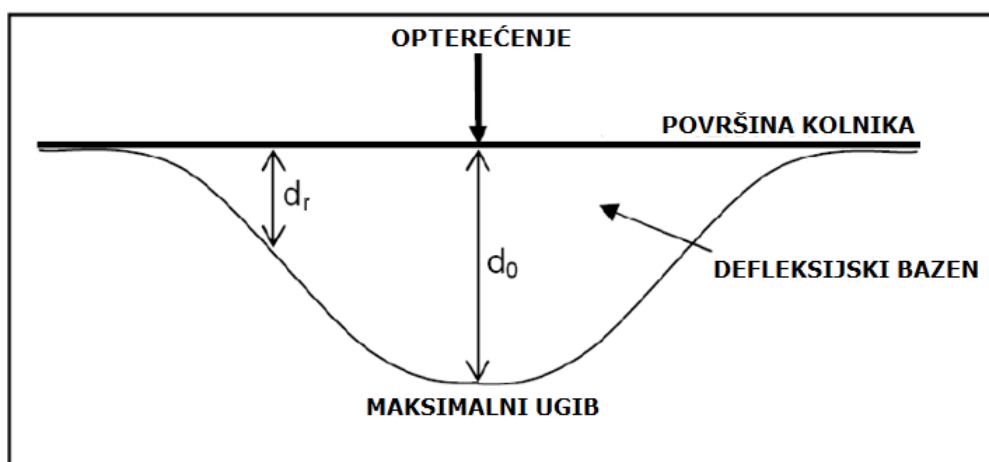
Uslijed djelovanja opterećenja, na kolniku dolazi do pojave takozvanog defleksijskog bazena (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016), kao što je prikazano Slikom 4.

Defleksijski bazen područje je koje autori dijele na tri karakteristične zone, što je objašnjeno niže i prikazano Slikom 5.

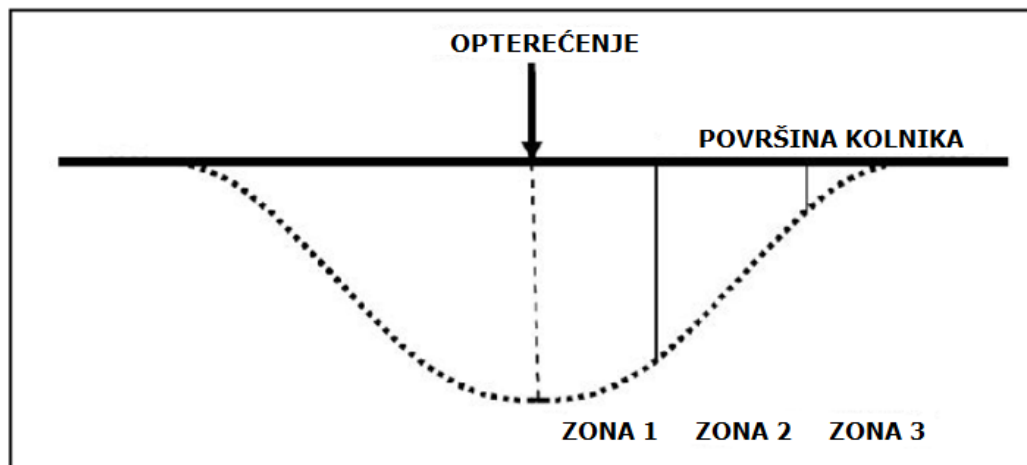
Zona 1 područje je koje se nalazi neposredno u zoni opterećenja te se prostire sve do 300 milimetara udaljenosti od točke u kojoj opterećenje djeluje. U tom području krivulja koja omeđuje defleksijski bazen ima tendenciju pozitivnog zakrivljenja.

Zona 2 područje je promjene, gdje krivulja koja omeđuje defleksijski bazen ima tendenciju infleksije. Prostire se između 300 i 600 milimetara od točke u kojoj djeluje opterećenje.

Zona 3 proteže se od 600 pa sve do 2000 milimetara od točke djelovanja opterećenja, gdje krivulja koja omeđuje defleksijski bazen ima tendenciju negativnog zakrivljenja, stoga se može zaključiti da u njoj dolazi do uklapanja krivulje defleksijskog bazena s površinom kolnika.



Slika 4 Defleksija (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016)



Slika 5 Elementi defleksijskog bazena (preuzeto iz Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016)

Prema autorima (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016; Talvik i Aavik, 2009), neki od karakterističnih parametara defleksije su:

- Radijus zakrivljenja
- Indeks zakrivljenosti površine (eng. *surface curvature index* – *SCI*)
- Indeks zakrivljenosti podloge (eng. *base curvature index* – *BCI*)
- Indeks oštećenja podloge (eng. *base damage index* – *BDI*)
- Površina defleksijskog bazena

Talvik i Aavik (2009) proveli su istraživanje u Estoniji kako bi procijenili stanje kolnika koristeći parametre defleksijskog bazena (indekse zakrivljenosti površine, zakrivljenosti podloge i oštećenja podloge) uz mjerenje uređajem s padajućim teretom. Iako nisu uspjeli uspostaviti izravnu povezanost između parametara defleksijskog bazena i defleksija površine kolnika, otkrili su da ti parametri snažno koreliraju s modulom elastičnosti, koji je izračunat pomoću povratnih analiza. Također, prvi put provedene statističke analize opsežnih baza podataka u Estoniji sugeriraju da bi se razvijene granične vrijednosti parametara defleksijskog bazena mogle koristiti za procjenu stanja kolnika na mrežnoj razini, premda je potrebno dodatno evaluirati i, po potrebi, ispraviti te vrijednosti. Predloženi pristup sugerira identificiranje dijelova cesta s nedostatnom strukturnom nosivošću koristeći mjerenja uređajem s padajućim teretom i metodu za određivanje maksimalnih graničnih vrijednosti parametara defleksijskog bazena.

S obzirom na sve navedeno, može se zaključiti kako se ne treba osloniti samo na parametre defleksijskog bazena za predviđanje ili procjenu specifičnih oštećenja kolnika. Kako bi se bolje razumjela povezanost parametara defleksijskog bazena i oštećenja nastala na kolniku te kako bi se bolje procijenilo stanje nosivosti konstrukcije kroz mjeru defleksije, potrebno je osloniti se na dodatne informacije. Cuculić i suradnici (2020) stoga razlikuju dva načina utvrđivanja iznosa defleksije: teorijski i empirijski. Kombinacijom teorijskih i empirijskih metoda, inženjeri mogu dobiti sveobuhvatnu sliku strukturalnog stanja kolnika, kao i bolje razumjeti i predvidjeti nosivost kolničke konstrukcije pod različitim uvjetima opterećenja. Ove informacije su ključne za planiranje održavanja, rekonstrukcije i nadogradnje cesta, što dugoročno doprinosi sigurnosti i efikasnosti prometne infrastrukture.

3.2. Teorijski pristup

Teorijski pristup mjerenju iznosa defleksije uključuje korištenje raznih matematičkih modela i zakona fizike kako bi se procijenila nosivost kolnika, odnosno kako bi se moglo predvidjeti kako će se kolnik ponašati pod određenim opterećenjem. Korištenje teorijskih pristupa podrazumijeva detaljno poznavanje materijalnih svojstava slojeva kolnika, geometrijskih karakteristika konstrukcije, te vrsta i veličine opterećenja kojima je konstrukcija izložena, kao i zakonitosti teorije elastičnosti. Korištenjem teorije elastičnosti, u proračunu strukturalnih svojstava uvode se određena pojednostavljenja u odnosu na stvarno stanje naprezanja i deformacija u konstrukciji. Na primjer, teorija elastičnosti pretpostavlja da su materijali homogeni i izotropni, što u stvarnosti može varirati. Iako ova pojednostavljenja mogu značiti odstupanja od stvarnog stanja, ona su često prihvatljiva jer omogućuju dovoljno precizne analize za potrebe projektiranja i održavanja kolnika. Cuculić i suradnici (2020) nadalje objašnjavaju kako je primjena teorije elastičnosti opravdana s obzirom na tip opterećenja koje djeluje na kolnik, kao i zbog strukturnih i funkcionalnih zahtjeva kolnika tijekom njegove upotrebe. Prema Rukavina i Ožbolt (2009), najraširenija metodologija za interpretaciju informacija o defleksiji je računanje kroz modul elastičnosti pojedinih slojeva kolničke konstrukcije.

Modul elastičnosti već je spomenut kao jedan od načina izražavanja mehaničkih, odnosno svojstava materijala kolnika, na čemu se najčešće temelji vrijednost defleksije, a samim time i ocjena nosivosti cijele konstrukcije.

Modul elastičnosti naziva se još i Youngov modul, a označava se oznakom E . Opisuje sposobnost materijala da se deformira pod utjecajem neke sile, odnosno prilikom naprezanja. Nadalje, modul elastičnosti kvantificira sposobnost materijala da se vrati u svoj izvorni oblik nakon što je opterećenje uklonjeno. Viša vrijednost modula elastičnosti ukazuje na veću krutost materijala, što znači da će se manje deformirati pod opterećenjem. Niža vrijednost znači da je materijal savitljiv ili elastičan, odnosno da se lako deformira pod primijenjenom silom (na primjer: guma i plastika).

U literaturi se modul elastičnosti definira kao omjer naprezanja (eng. *stress*) i deformacije (eng. *strain*) u linearnom području naprezanja i deformacije materijala. Na primjer, na grafu, gdje je naprezanje na y -osi, a deformacija na x -osi, linija u elastičnom području materijala je linearna, a nagib te linije predstavlja modul elastičnosti. Formula za modul elastičnosti izgleda ovako:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3.1.)$$

Gdje:

E = modul elastičnosti

σ = naprezanje (sila primijenjena po jedinici površine materijala; izražava se u pascalima [Pa] ili megapascalima [MPa])

ε = deformacija (promjena dužine materijala po jedinici originalne dužine; najčešće se izražava kao decimalna vrijednost ili postotak)

Modul elastičnosti ključan je parametar za razumijevanje i analizu ponašanja kolničke konstrukcije jer njegovo izračunavanje i poznavanje osigurava stabilnost i otpornost konstrukcija na sva opterećenja koja podnosi. Razumijevanje i korištenje modula elastičnosti ključno je kako bi stručnjaci mogli pravilno dizajnirati i analizirati različite materijale i strukture. Detaljnije, precizno poznavanje i korištenje modula elastičnosti za potrebe izračunavanja vrijednosti defleksije i nosivosti kolničkih konstrukcija omogućava inženjerima da učinkovito dizajniraju, održavaju i optimiziraju cestovnu infrastrukturu, osiguravajući njenu dugoročnu funkcionalnost i sigurnost.

Ukratko, teorijske metode proračuna strukturalnog stanja kolničke konstrukcije, temeljene na teoriji elastičnosti, ključne su za razumijevanje i predviđanje ponašanja kolničke konstrukcije pod opterećenjem. Iako sa sobom nose određena pojednostavljenja, ove

metode omogućuju dovoljno precizne analize koje su vitalne za učinkovito planiranje, dizajn i održavanje cestovne infrastrukture.

3.3. Empirijski pristup

Empirijski pristup odnosi se na eksperimentalne podatke i stvarna mjerenja kako bi se mogla odrediti nosivost kolnika. Podrazumijeva, dakle, direktno mjerenje elastične deformacije kolnika pod već poznatim opterećenjem. Empirijska mjerenja pružaju točne i pouzdane podatke o trenutačnom stanju kolnika, što je ključno za njegovo pravilno održavanje i obnovu. Važno je znati da je empirijska mjerenja iznosa defleksije moguće izvesti pod statičkim ili dinamičkim opterećenjem. Statično opterećenje podrazumijeva primjenu konstantne sile na konstrukciju kroz dulji period, dok se dinamičko opterećenje odnosi na promjenjivo, ciklično opterećenje koje simulira prolazak vozila preko kolnika. Rukavina (2017) objašnjava kako se zbog razvoja novijih mjernih uređaja te činjenice da je djelovanje prometa vrlo dinamično, sve manje koriste uređaju sa statičkim djelovanjem, kao što su Benkelmanova greda, putujući deflektometar ili deflektometar La Croix. Također, spominju se različiti noviji uređaji s dinamičkim djelovanjem – Dynaflect, Curviameter, Road Rater, razni laki i teški vibratori te prije spomenuti uređaj s padajućim teretom. Podaci dobiveni empirijskim mjerenjima pružaju konkretne informacije o trenutačnom stanju kolnika te omogućuju precizniju procjenu njegove nosivosti, kao i identifikaciju područja koja zahtijevaju popravke ili rehabilitaciju.

3.4. Metode ocjene nosivosti kolničke konstrukcije

Iz prethodno opisanih pristupa, teorijskog i empirijskog, razvijene su različite metode koje se koriste u nastavku ovog rada. Konkretno, primjenjuje se metoda povratnih analiza koja omogućuje procjenu strukturalnog stanja kolničke konstrukcije na temelju mjerenih podataka. Uz nju se koristi i metoda indeksa nosivosti slojeva, koja služi kao dodatna provjera točnosti i pouzdanosti rezultata dobivenih metodom povratne analize. Takav kombinirani pristup omogućuje detaljniju procjenu nosivosti i ponašanja slojeva kolničke konstrukcije pod prometnim opterećenjem.

3.4.1. Metoda povratnih analiza

Dynatest (2024) navodi ELMOD (eng. *Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design*) kao najnapredniji program za analizu kolnika koji se koristi za strukturnu procjenu različitih kolničkih konstrukcija na današnjem tržištu. Najnovija verzija programa, ELMOD 6, korištena je i za analizu podataka u ovom radu. Program značajno pomaže inženjerima kolnika u projektiranju konstrukcija, omogućujući im složene analize podataka dobivenih uređajima s padajućim teretom. Sam softver izračunava strukturnu čvrstoću na temelju mehaničko-empirijskih načela i određuje preostali vijek trajanja kolnika, potrebna pojačanja ili potrebnu debljinu sloja kolnika (Dynatest, 2024).

Na temelju rezultata mjerenja ugiba površine kolnika konstrukcije pomoću uređaja s padajućim teretom, moguće je kasnije, uz pomoć programa, odrediti sljedeće:

- mjerodavan ugib,
- dinamičke module elastičnosti materijala slojeva kolničke konstrukcije te
- preostalo razdoblje trajanja kolničke konstrukcije i eventualnu potrebnu debljinu novog sloja.

Kako bi se odredile karakteristike kolničke konstrukcije u postojećem stanju, odnosno elastični parametri u odnosu na debljinu slojeva, koji u velikoj mjeri ovise o starosti kolnika i kumulativnom prometnom opterećenju (ukupno opterećenje koje je prošlo preko kolnika od izgradnje do trenutka mjerenja), provodi se povratna analiza (eng. *backcalculation*).

Podaci potrebni za provođenje povratne analize obuhvaćaju ključne informacije o kolničkoj konstrukciji, uključujući broj slojeva i njihove pojedinačne debljine.

Kako bi se omogućila objektivna procjena stanja kolničke konstrukcije, primijenjene su smjernice za ocjenu stanja kolnika koje propisuje ASFiNAG. Ove smjernice definiraju ključne parametre i granične vrijednosti na temelju kojih se procjenjuje kvaliteta kolnika te predstavljaju standard u analizi nosivosti i dugovječnosti prometnica. Konkretni parametri korišteni u analizi dionice B2 autoceste A2 prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1 Parametri određivanja stanja kolnika prema ASFiNAG-u (izradio autor)

Asfaltni slojevi	EASF > 5000 MPa	vrlo dobro stanje
	2500 MPa < EASF < 5000 MPa	dobro stanje
	EASF < 2500 MPa	loše stanje
hidrauličkim vezivom vezani nosivi sloj – CNS	ECNS > 7000 MPa	vrlo dobro stanje
	2000 MPa < ECNS < 7000 MPa	dobro stanje
	ECNS < 2000 MPa	loše stanje
nevezani, mehanički zbijeni nosivi sloj – MNS	EMNS > 350 MPa	vrlo dobro stanje
	200 MPa < EMNS < 350 MPa	dobro stanje
	EMNS < 200 MPa	loše stanje
posteljica	Eposteljica > 200 MPa	vrlo dobro stanje
	100 MPa < Eposteljica < 200 MPa	dobro stanje
	Eposteljica < 100 MPa	loše stanje.

Na temelju prikazanih podataka, mogu se dobiti sljedeći dijagrami:

- dijagrami defleksija,
- površinski moduli,
- dijagrami debljine slojeva.

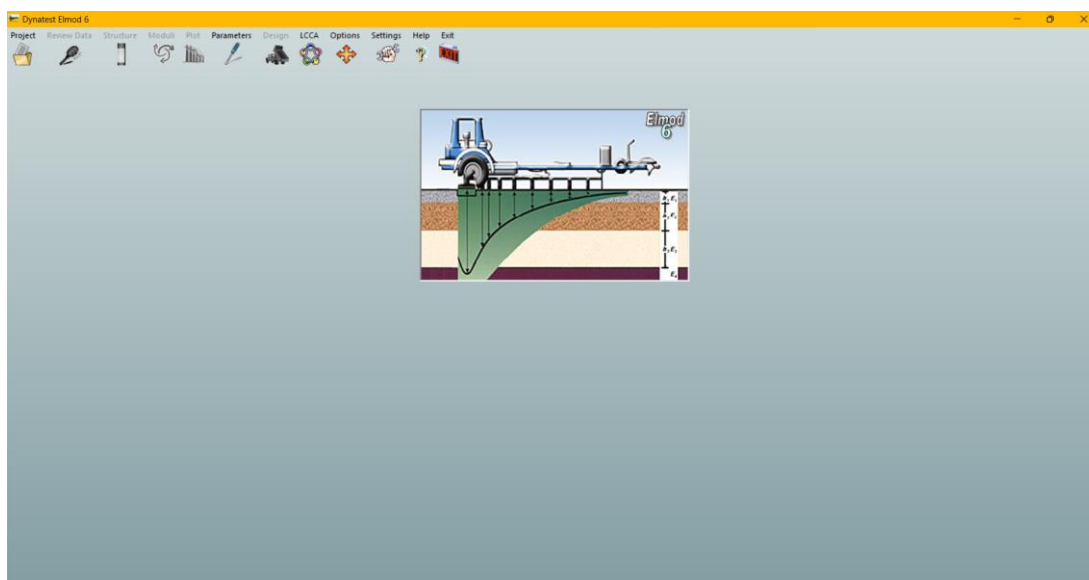
Postupak određivanja modula elastičnosti slojeva kolničke konstrukcije započinje pretpostavljanjem svojstava materijala od kojih je kolnik izgrađen, bilo to na osnovi iskustva ili nekim otprije poznatih podataka. Na temelju tih pretpostavljenih vrijednosti vrši se izračun defleksije nekom od mogućih metoda izračuna. Prema Podzer, Mazić i Mihajlović (2016), u programu se dalje mogu vršiti tri metode izračuna: linearno-elastična teorija (LET), metoda konačnih elemenata (FEM) te metoda ekvivalentnih debljina (MET).

Paralelno s time, provode se i mjerenja defleksija i defleksijskog bazena, a zatim se izračunate vrijednosti uspoređuju s izmjerenima, a modul elastičnosti se prilagođava sve dok razlika između izmjerenih i izračunatih defleksija ne postane prihvatljiva.

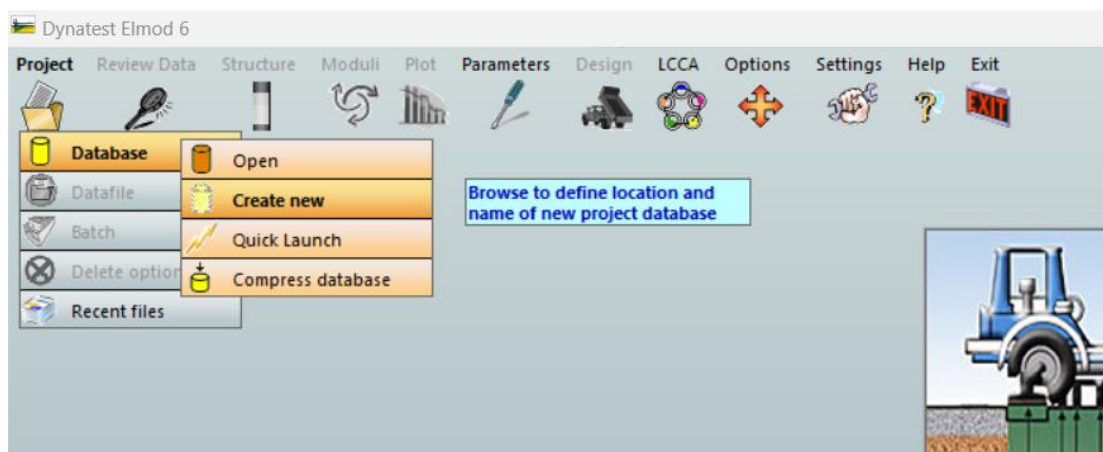
Izračun metodom povratnih analiza u programu ELMOD 6

U sljedećim koracima će se opisati postupak korištenja programa ELMOD za analizu kolničke konstrukcije. Ovaj softver omogućuje proračun modula elastičnosti slojeva, koji su ključni za procjenu stanja i nosivosti ceste. Kroz niz definiranih koraka bit će objašnjen način unosa podataka, postavke modela te generiranje rezultata koji će poslužiti kao osnova za ocjenu strukturalnog stanja kolnika, i to korištenjem metode povratnih analiza.

KORAK 1) Početni korak korištenja aplikacije ELMOD 6 je otvaranje njenog početnog sučelja. Početno sučelje programa ELMOD 6 prikazano je Slikom 6. Nakon otvaranja sučelja, potrebno je otvoriti novi projekt, kako je to prikazano na Slici 7.



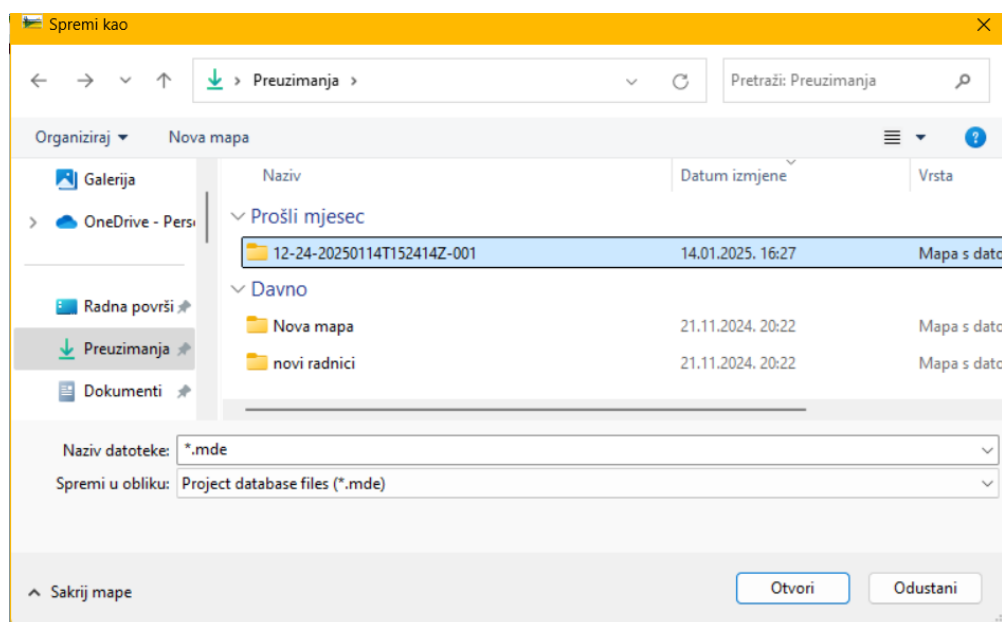
Slika 6 Početno sučelje programa (izradio autor)



Slika 7 Otvaranje novog projekta u programu (izradio autor)

KORAK 2) Dalje u procesu analize potrebno je odabrati odgovarajuće datoteke s ekstenzijom .mde, što je prikazano Slikom 8. Ova ekstenzija označava format datoteke koji sadrži podatke potrebne za daljnju obradu u programu ELMOD 6.

Za ovaj konkretan izračun, odabrana datoteka sadrži rezultate mjerenja dobivene pomoću uređaja s padajućim teretom, koji služi za procjenu nosivosti kolničke konstrukcije. Podaci se odnose na dionicu autoceste A2 Zagreb–Macelj, i to na segment između 24. i 42. kilometra u smjeru Krapine. Ovi podaci predstavljaju osnovu za daljnju analizu i procjenu stanja cestovne konstrukcije.

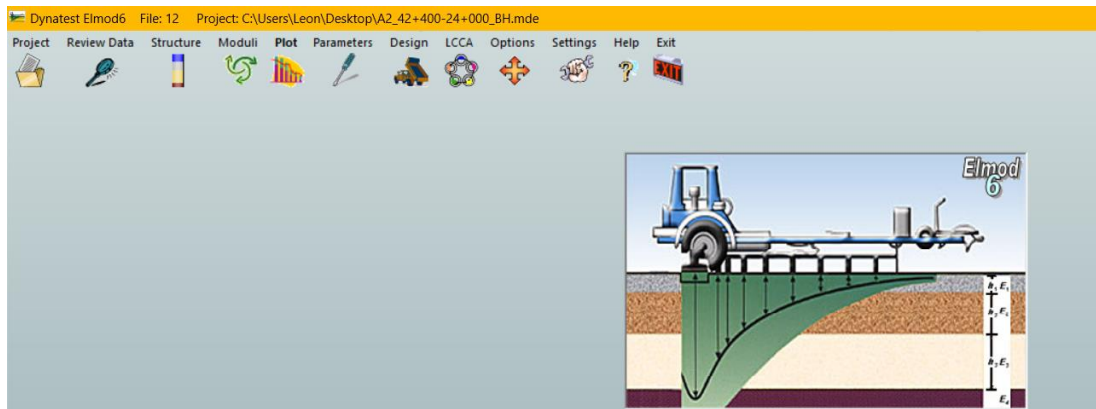


Slika 8 Odabir odgovarajuće datoteke (izradio autor)

KORAK 3) Nakon što se učita datoteka koja sadrži relevantne podatke dobivene terenskim mjerenjima, program automatski prepoznaje unesene informacije te omogućuje daljnju analizu. U ovom trenutku otključavaju se sve relevantne opcije dostupne u alatnoj traci, čime korisnik dobiva pristup različitim funkcijama potrebnim za obradu i interpretaciju podataka.

Ove opcije, prikazane na slici 9, omogućuju pregled, filtriranje i prilagodbu ulaznih podataka, odabir analitičkih metoda te pokretanje izračuna ključnih parametara. Dodatno, korisniku su dostupne i mogućnosti vizualizacije rezultata, što olakšava interpretaciju dobivenih vrijednosti modula elastičnosti i procjenu strukturalnog stanja kolničke konstrukcije. Ovaj

korak predstavlja ključni trenutak u analizi, jer omogućuje prilagodbu modela prema specifičnim uvjetima promatrane dionice ceste.



Slika 9 Opcije programa (izradio autor)

KORAK 4) Nakon što su podaci učitani u program, prvi korak analize trebao bi biti njihov detaljan pregled kako bi se osiguralo da su svi relevantni parametri ispravno uneseni i da nema nepravilnosti koje bi mogle utjecati na daljnju obradu. Klikom na gumb „Review Data“, otvara se prozor koji daje uvid u ključne informacije o provedenim mjerenjima (Slika 10).

U ovom prikazu moguće je vidjeti broj aktivnih geofona i njihove udaljenosti od središta opterećenja, što je važno za razumijevanje raspodjele deformacija u kolničkoj konstrukciji.

Najvažniji dio ovog pregleda predstavlja tablica defleksija, u kojoj su prikazane izmjerene vrijednosti tih defleksija kolničke konstrukcije pod opterećenjem. Ove vrijednosti ključne su za kasniju povratnu analizu, jer na temelju njih program računa module elastičnosti pojedinih slojeva.

U slučaju da program ne može provesti povratnu analizu (na primjer, zbog prevelikih odstupanja u određenim vrijednostima defleksija), potrebno je ponovno pogledati tablicu defleksija i detaljno provjeriti podatke. U takvim situacijama može biti potrebno filtrirati ili korigirati potencijalne ekstremne vrijednosti te ponoviti samu analizu kako bi se osigurala točnost rezultata i vjerodostojnost procjene stanja kolničke konstrukcije.

Data view and editing

File 12 Database C:\Users\Leon\Desktop\A2_42+400-24+000_BH.mde podaci o dionici i broju ispitnih padova

Number of data points 184 Number of drops 3 Start Station 24050 End Station 42450 Date 29. rujan 2015. File Info

Number of active geophones 9 Plate radius 150. radijus ispitne ploče view geophone positions

Geophone distances
 1: 0 2: 300 3: 300 4: 200 5: 200 6: 300 7: 300 8: 450 9: 600
 10: 900 11: 1200 12: 1500 13: 1800 udaljenosti geofona

tablica defleksija

Chainage	Point	Drop	Stress KPa	Load KN	D1 Micr.	D2 Micr.	D3 Micr.	D4 Micr.	D5 Micr.	D6 Micr.	D7 Micr.	D8 Micr.	D9 Micr.	D10 Micr.	D11 Micr.	D12 Micr.	D13 Micr.	T _{asp} °C	T _▲
24050	184	1	692	48,91	273,4	231,7	213,9	243,8	236,4	219,7	213,2	187,5	152,8	101,9	65,4	42,6	29,1		
		2	718	50,75	260,9	222,1	203,8	231,4	226,4	208,2	205,3	177,0	144,1	97,1	64,1	43,8	32,3		
		3	705	49,83	255,3	217,1	199,0	226,0	221,4	203,4	200,9	173,1	141,0	94,9	62,9	43,4	31,9		
24150	183	1	682	48,21	296,8	276,8	223,9	276,6	252,2	256,4	226,1	220,7	178,0	111,7	69,7	45,3	32,9		
		2	723	51,11	278,1	257,5	209,2	255,1	236,7	236,0	212,6	201,3	161,9	102,6	65,5	45,6	35,1		
		3	707	49,97	269,9	250,9	203,7	249,2	230,6	229,5	207,2	196,3	157,9	100,3	64,0	44,6	34,2		
24250	182	1	713	50,40	187,6	169,0	147,4	170,1	156,7	154,2	141,5	130,5	107,8	75,2	53,4	39,4	31,3		
		2	719	50,82	171,5	154,1	133,6	153,5	143,6	138,5	130,0	117,3	97,0	69,0	49,6	37,9	30,2		
		3	712	50,33	168,4	151,7	131,6	150,8	141,0	136,2	127,8	115,4	95,5	68,0	49,4	38,0	30,9		
24350	181	1	670	47,36	217,9	176,6	180,3	197,8	187,9	181,0	171,3	154,3	125,8	86,2	58,6	42,5	31,1		
		2	738	52,17	212,7	171,5	174,1	189,1	184,2	173,2	169,5	147,9	119,7	83,6	58,8	44,2	32,6		
		3	711	50,26	204,8	165,0	167,8	182,0	177,5	166,9	162,7	142,4	116,5	80,5	56,4	41,7	32,4		
24450	180	1	703	49,69	225,4	202,0	175,6	200,7	202,9	184,7	186,1	159,3	133,1	95,1	65,7	47,7	35,6		

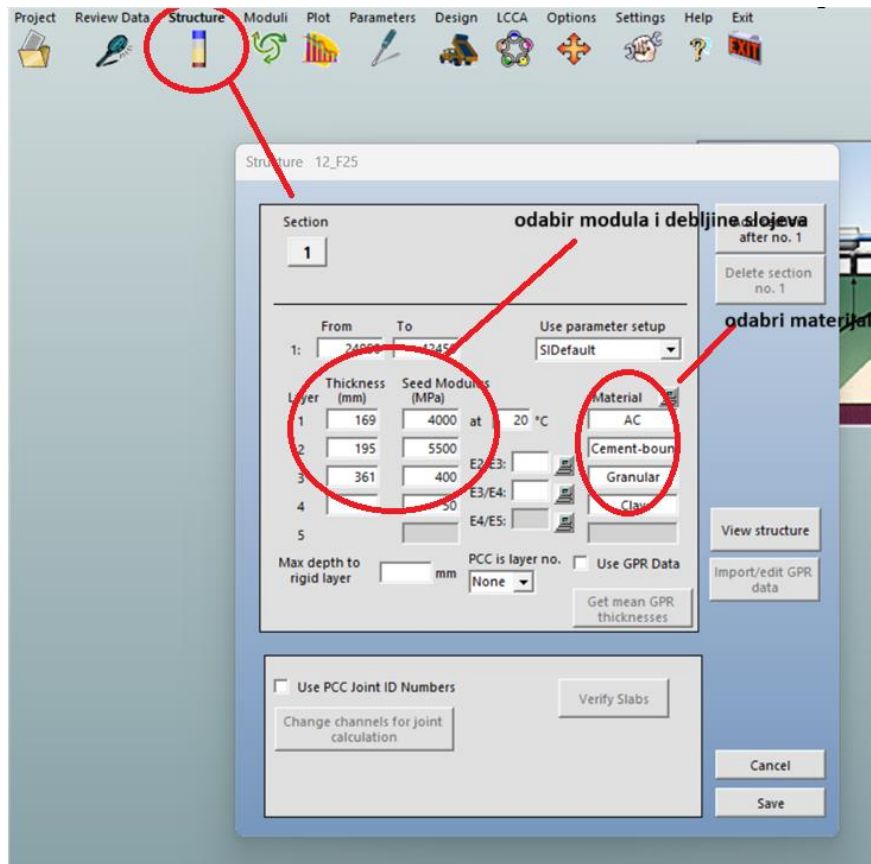
<Alt> + click Chainage to remove test point
 Right click Chainage or Point to mark/unmark

Split file Temperature graphs Insert asphalt temperatures Cancel Save new data

Slika 10 Prikaz ključnih informacija mjerenja (izradio autor)

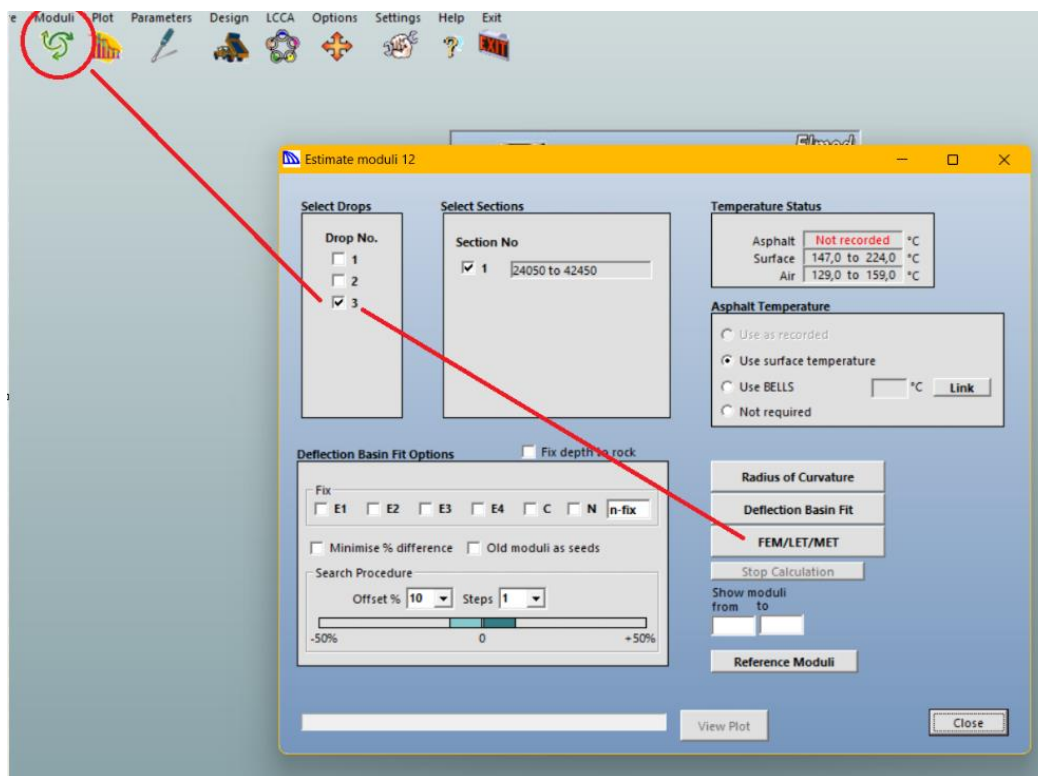
KORAK 5) Sljedeći korak u procesu analize uključuje unos debljina, materijala i modula elastičnosti slojeva koji čine kolničku konstrukciju. Ove informacije ključne su za precizno modeliranje ponašanja ceste pod opterećenjem. Da bi se došlo do odgovarajućeg izbornika, potrebno je odabrati gumb „Structure” u alatnoj traci, čime se otvara prozor za unos podataka o strukturi kolnika, kao što je prikazano Slikom 11.

U ovom koraku u program se unose specifični detalji o svakom sloju konstrukcije, kao što je već navedeno - debljina slojeva, vrsta materijala (npr. asfalt, betonski slojevi, šljunak) i modul elastičnosti za svaki sloj, koji je ključan za procjenu nosivosti. Ovi podaci direktno utječu na izračune koji će odrediti nosivost i stabilnost kolničke konstrukcije pod stvarnim uvjetima prometa. Pravilno postavljene parametri osiguravaju točnost daljnjih analiza i korektnost rezultata.



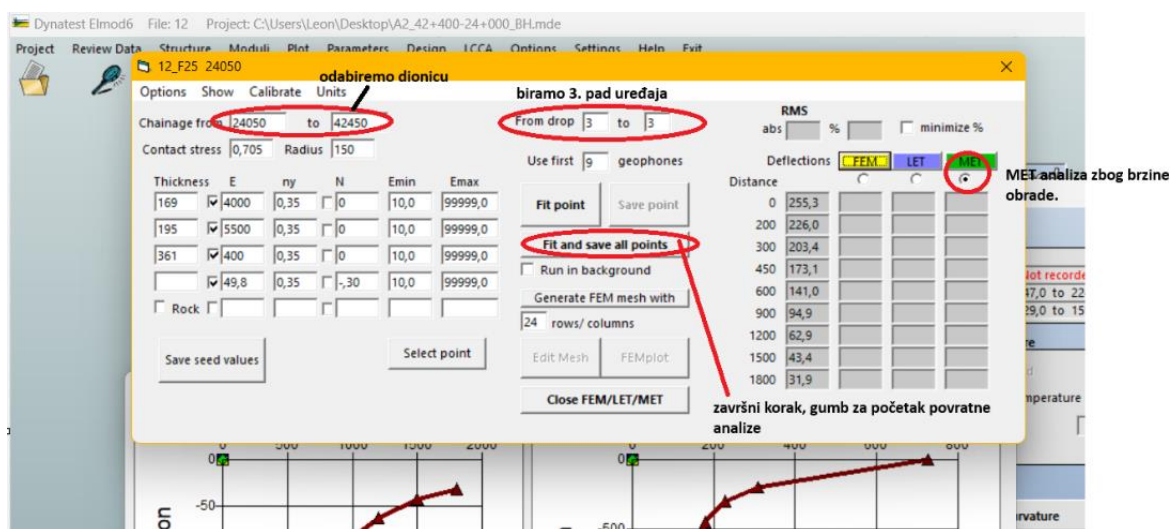
Slika 11 Unos podataka u program (izradio autor)

KORAK 6) Sljedeći korak podrazumijeva početak povratne analize. U alatnoj traci potrebno je odabrati gumb „Moduli” koji zatim otvara sučelje povratne analize. U sučelju je potrebno odabrati željeni tip analize, koji je usklađen s pravilnicima. Prema smjernicama pravilnika, u sučelju je potrebno odabrati treći „Drop”. Nadalje, potrebno je još odabrati željenu metodu izračuna, odnosno FEM/LET/MET analizu.



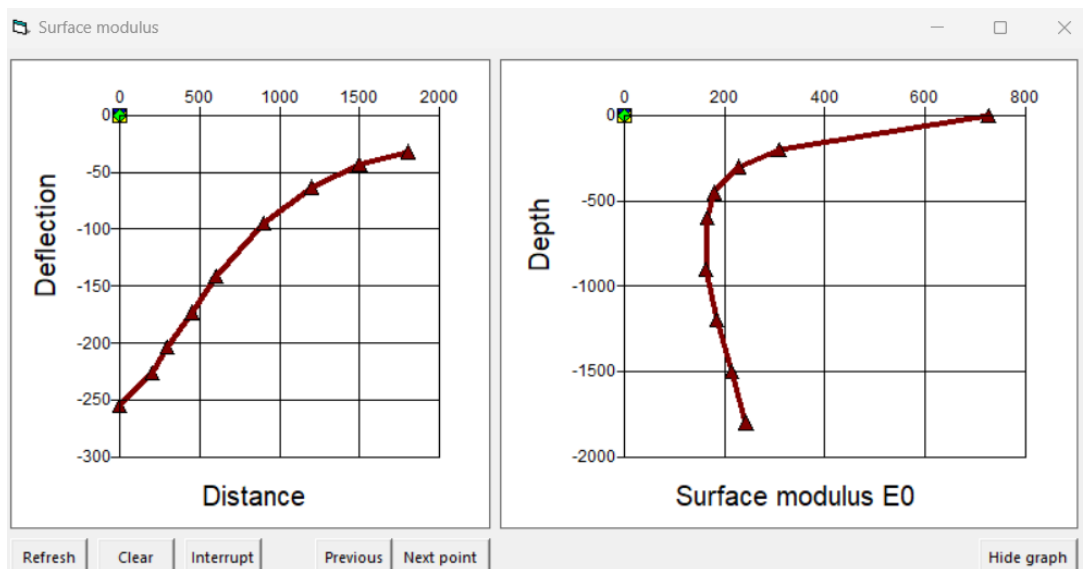
Slika 12 Početak povratne analize (izradio autor)

KORAK 7) Nakon odabira željene metode izračuna (FEM/LET/MET analize), otvara se novi prozor u kojem je moguće dalje prilagoditi parametre željene analize. U ovom je slučaju odabrana MET analiza (Slika 13) zbog brzine obrade podataka. Pod opcijom „Chainage” treba unijeti duljinu cijele dionice koju je potrebno analizirati. Međutim, ta duljina nije fiksna i moguće ju je prilagoditi ovisno o specifičnoj dionici za koju se žele dobiti podaci.



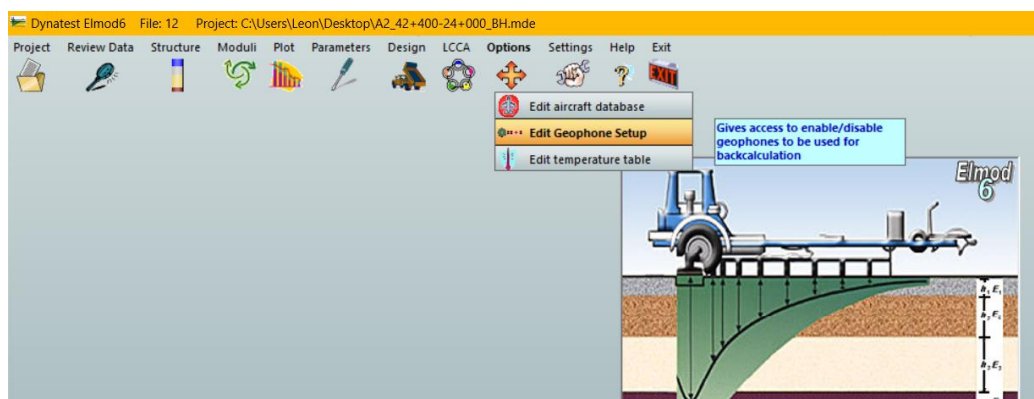
Slika 13 Odabir MET analize (izradio autor)

KORAK 8) Nakon što se odabere gumb „Fit and Save All Points“ program započinje s obradom podataka, kao što se može vidjeti na slici 14. Osim toga, odabir te funkcije omogućava automatsko prilagođavanje i pohranu svih podataka prethodno unesenih u program.



Slika 14 Početak obrade podataka (izradio autor)

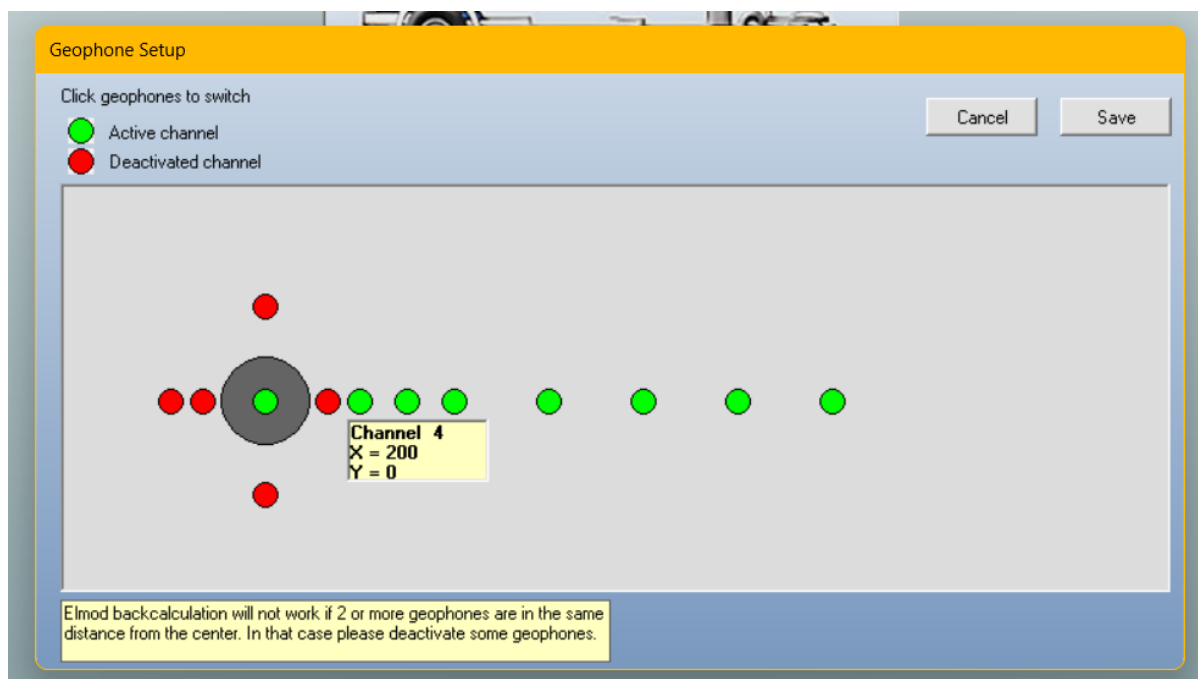
KORAK 9) Kada računalno obradi sve podatke, javlja se putem obavijesti. Na ovoj razini analize, moguće je da dođe do nekih grešaka. Ako se to dogodi, potrebno je vratiti se na korak 4, gdje je već objašnjen postupak korekcije iste. Ipak, do grešaka u analizi može doći i zbog prevelikog broja upaljenih geofona. Popravlak pozicija geofona vrši se na način da se klikne gumb „Options“, što otvara opciju ulaza u izbornik za namještanje i kalibraciju geofona (Slika 15).



Slika 15 Popravlak smještaja geofona (izradio autor)

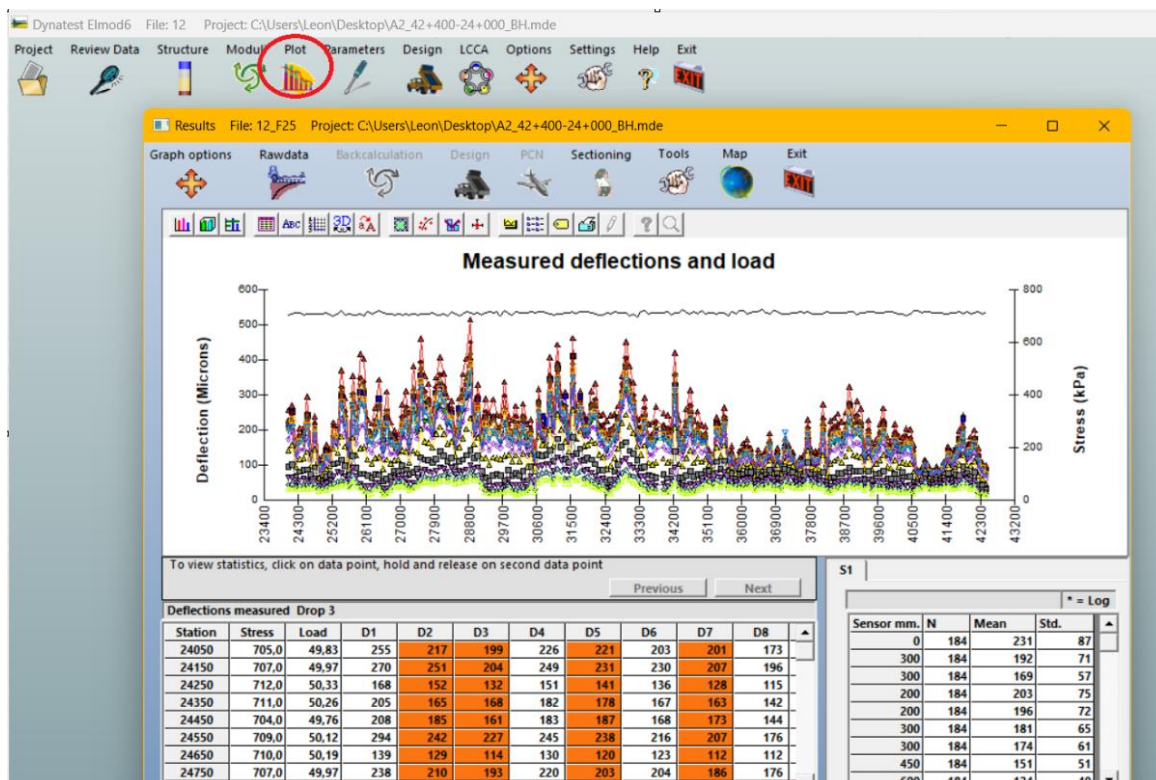
Otvora se sljedeći izbornik u kojemu klikom na pojedine geofone možemo birati njihovu aktivnost ili neaktivnost.

Nadalje, klikom na spomenuti izbornik otvara se prostor u kojem se pojedini geofoni mogu aktivirati ili deaktivirati prema potrebi, što je prikazano Slikom 16.



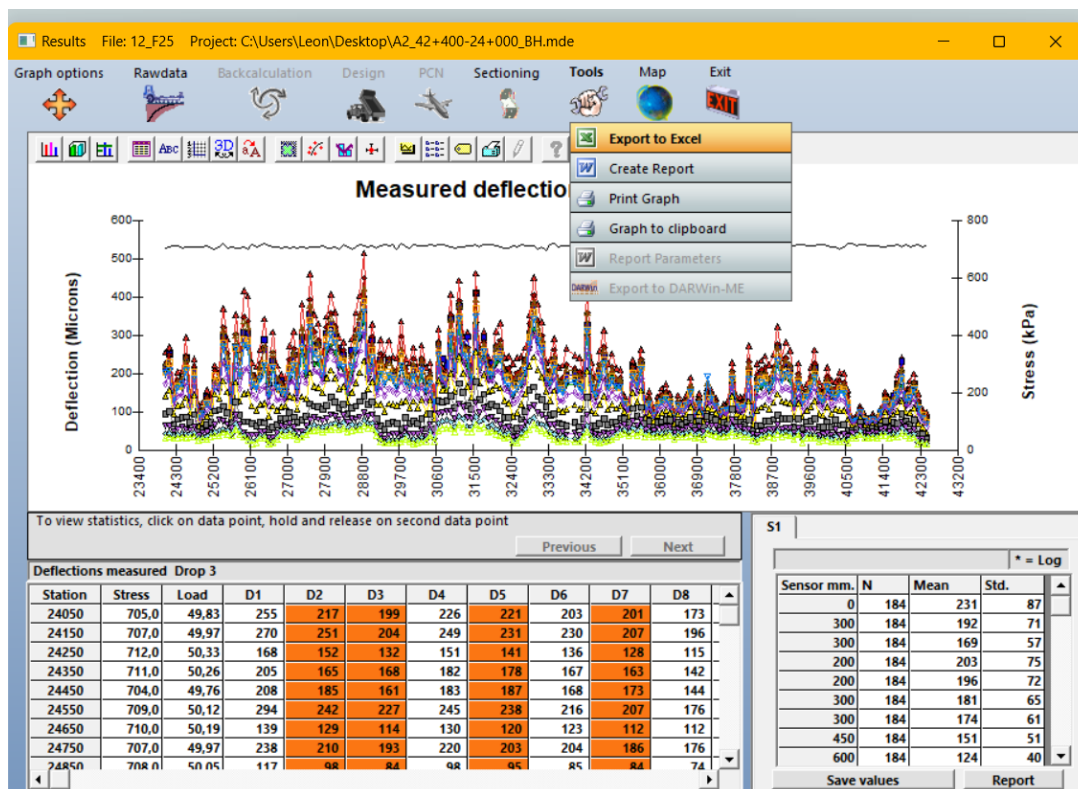
Slika 16 Prostor za aktivaciju geofona (izradio autor)

KORAK 10) Nakon što je analiza provedena, potrebno je pregledati dobivene rezultate. Kako bi se to ostvarilo, potrebno je kliknuti na gumb „Plot“ koji se nalazi u alatnoj traci. Klikom na taj gumb, program automatski generira dijagram koji prikazuje dobivene rezultate, što je prikazano i Slikom 17. Sam dijagram zorno prikazuje ključne podatke analize, što omogućuje laku interpretaciju rezultata povratne analize. Sam dijagram može sadržavati različite vrste prikaza, ovisno o parametrima koji su bili odabrani ranije u procesu, što omogućava korisnicima da donesu informirane odluke o daljnjim koracima u poboljšanju ili sanaciji specifične dionice kolničke konstrukcije.



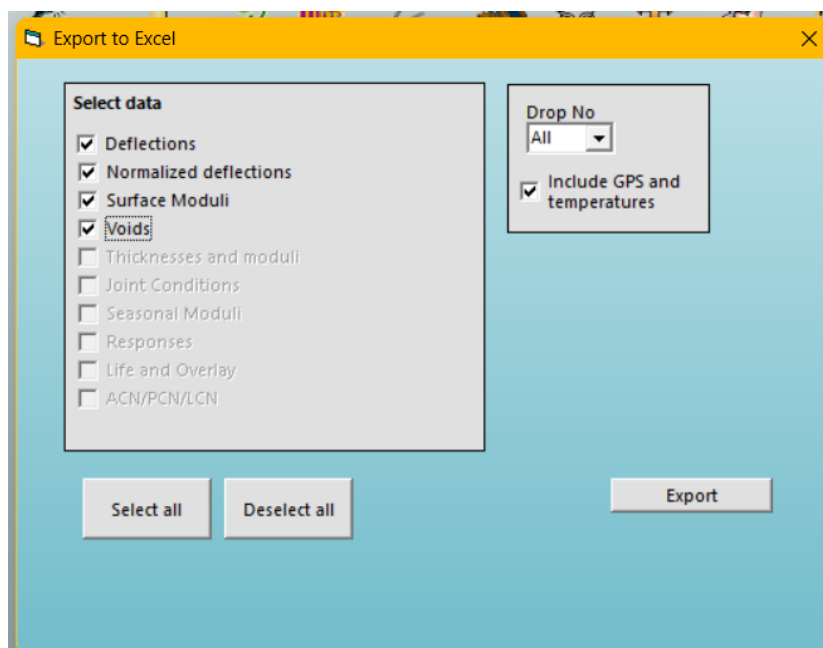
Slika 17 Dijagram dobivenih rezultata (izradio autor)

KORAK 11) Na alatnoj traci sučelja „Plot“ odabiremo gumb „Tools“, a zatim biramo opciju „Export to Excel“ ili „Export to Word“, ovisno o vrsti podataka koje želimo izvesti. Važno je napomenuti da module elastičnosti nije moguće izvesti u *Word*, već se za takve podatke mora odabrati *Excel* (Slika 18). Ova funkcionalnost omogućuje jednostavno prebacivanje rezultata u željeni format, čime se olakšava daljnja analiza, izvještavanje ili pohrana podataka.



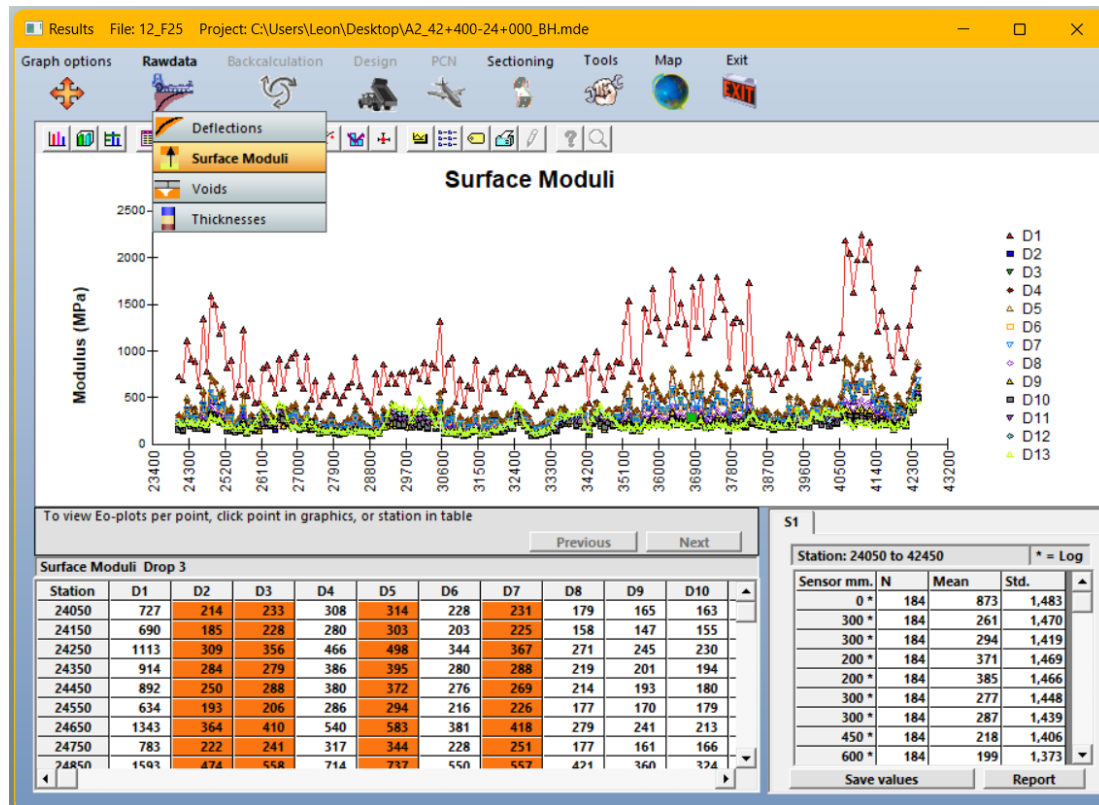
Slika 18 Izvoz podataka u Excel (izradio autor)

KORAK 12) Nakon odabira željene aplikacije za izvoz podataka, potrebno je odabrati i vrstu podataka koje je potrebno izvesti, kao što je prikazano u primjeru (Slika 19).



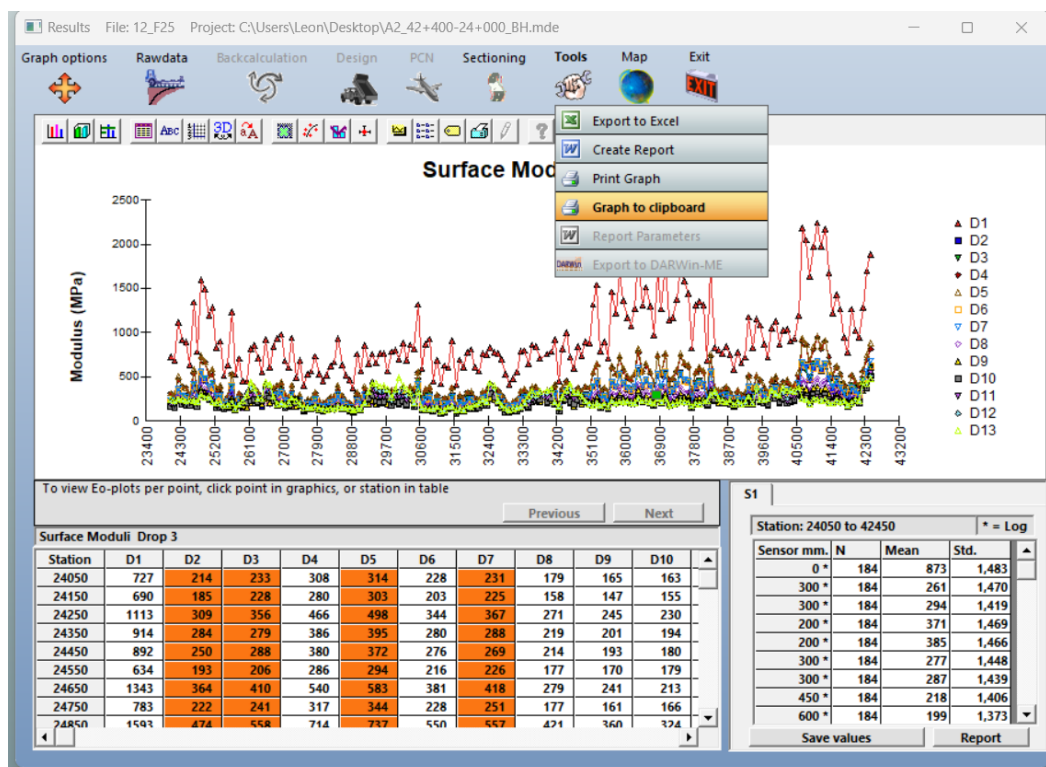
Slika 19 Odabir vrste podataka za izvoz (izradio autor)

KORAK 13) Kako bi se generirao dijagram modula potrebno je odabrati gumb „Raw data“, a unutar njega opciju „Surface moduli“. Nakon toga, otvara se dijagram površinskih modula, što pruža vizualni uvid u raspodjelu elastičnosti na površinskim slojevima kolničke konstrukcije (Slika 20).



Slika 20 Dijagram površinskih modula (izradio autor)

KORAK 14) Za izvođenje dobivenog dijagrama u drugu aplikaciju, preporučuje se koristiti opciju „Graph to Clipboard“ (Slika 21), koja omogućuje kopiranje grafa u međuspremnik, što dalje pruža opciju korištenja grafa u različitim programima. Kopirani se graf dalje jednostavno može zalijepiti u aplikaciju kao što je AutoCAD, ili bilo koji drugi program koji podržava umetanje slika, čime se omogućuje daljnje uređivanje ili analiza. Ova funkcionalnost je izuzetno korisna jer omogućava jednostavno prenošenje i integraciju rezultata analize u druge projekte, izvještaje ili tehničke crteže.



Slika 21 Kopiranje grafa u međuspremnik (izradio autor)

Nakon što se izveze tablica koja sadrži podatke o površinskim modulima i njoj pripadajući graf, moguće je nastaviti s istraživanjem, odnosno usporedbom različitih metoda koje se mogu koristiti za dobivanje podataka o strukturi ceste. Ti podaci pružaju osnovu za analizu te omogućuju precizno ocjenjivanje nosivosti kolničke konstrukcije. Sukladno tome, sljedeći korak istraživanja trebao bi uključivati usporedbu rezultata dobivenih iz različitih pristupa, odnosno teorijskih i empirijskih metoda. Usporedbom je moguće provjeriti jesu li svi podaci usklađeni i kako se mogu primijeniti u stvarnim uvjetima, te identificirati prednosti i potencijalna ograničenja svake metode.

3.4.2. Metoda indeksa nosivosti

Metoda indeksa nosivosti (eng. *Bearing Capacity Index*) brza je i učinkovita metoda izračuna koja se koristi za procjenu strukturalnog stanja kolnika, odnosno za procjenu kapaciteta nosivosti kolnika. Temelji se na indeksima nosivosti, a u nastavku su detaljno objašnjena četiri ključna indeksa koja se koriste za izračune.

Prva dva indeksa, odnosno indeks nosivog sloja BLI i indeks radijusa zakrivljenosti ROC, pokazatelji su strukturalnog stanja površinskih (asfaltni sloj) i baznih nosivih slojeva (CNS).

Indeks BLI se definira kao razlika između defleksije izmjerene u središtu opterećenja i defleksije udaljene 300 milimetara od opterećenja, odnosno između točke geofona 1 i 6, prema sljedećoj formuli:

$$BLI = D_0 - D_{300} \quad (3.2.)$$

Indeks radijusa zakrivljenosti se definira kao sljedeći omjer:

$$ROC = \left(\frac{(L)^2}{2D_0(1 - \frac{D_{200}}{D_0})} \right) \quad (3.3.)$$

Gdje oznaka L predstavlja iznos od 127 mm odnosno 200 mm kada se pri mjerenju koristi uređaj sa padajućim teretom. Oznaka D_0 označuje defleksije izmjerene u središtu opterećenja a D_{200} označuje defleksije izmjerene na udaljenosti 200 milimetara od središta opterećenja.

Treći indeks, odnosno indeks srednjeg sloja, pokazatelj je strukturalnog stanja donjih nosivih slojeva, na primjeru dionice B2 - mehaničkog nosivog sloja. Određuje se kao razlika opterećenja na udaljenosti 600 milimetara i 300 milimetara, odnosno točke geofona 6 i 9, od središta, prema sljedećoj formuli:

$$MLI = D_{300} - D_{600} \quad (3.4.)$$

Četvrti indeks, odnosno indeks nosivog sloja, ukazuje na strukturalno stanje slojeva podloge, u ovom slučaju posteljice. Definira se kao razlika defleksije udaljene 600 i 900 milimetara od opterećenja, odnosno točke geofona 9 i 10, prema sljedećoj formuli:

$$LLI = D_{600} - D_{900} \quad (3.5.)$$

U tablici 2 moguće je vidjeti granične vrijednosti kriterija ocjenjivanja pojedinih slojeva kolnika. Navedene granične vrijednosti služe kao referentne točke za ocjenu stanja svakog od slojeva kolnika na temelju dobivenih rezultata mjerenja i odrađene analize (Horak, 2008).

Granične vrijednosti važne su jer pomažu prilikom donošenja odluke o tome zadovoljavaju li slojevi kolnika minimalne zahtjeve nosivosti i stabilnosti, ili je potrebno provesti daljnja ispitivanja ili određene intervencije. Vrijednosti označene crvenim pravokutnikom su vrijednosti koje će se uzimati kao mjerodavne u ovome radu, zato što je nosivi sloj promatrane dionice upravo cementom stabilizirani nosivi sloj.

Tablica 2 Granične vrijednosti ocjenjivanja slojeva kolnika (preuzeto iz Horak, 2008)

Tip nosivog sloja kolničke konstrukcije	Ocjena strukturnog stanja	ROC [m]	BLI [μm]	MLI [μm]	LLI [μm]
Mehanički zbijeni nosivi sloj	Dobro	>100	<200	<100	<50
	Upozoravajuće	50-100	200-400	100-200	50-100
	Loše	<50	>400	>200	>100
Cementom stabilizirani nosivi sloj	Dobro	>150	<100	<50	<40
	Upozoravajuće	80-150	100-300	50-100	40-80
	Loše	<80	>300	>100	>80
Asfaltni sloj	Dobro	>250	<200	<100	<50
	Upozoravajuće	100-250	200-400	100-150	50-80
	Loše	<100	>400	>150	>80

4. UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM

Uređaj s padajućim teretom uređaj je kojim se ispituje stanje kolnika kroz mjerenje defleksija koje se izazivaju padajućim teretom. Osim iznosa same defleksije, mjerenjem ovim uređajem moguće je odrediti i dinamičke module elastičnosti materijala (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016).

Prema podacima prikupljenim iz literature, mjerenje uređajem s padajućim teretom jedna je od najraširenijih nerazornih metoda ispitivanja stanja kolnika, a sam uređaj je i najčešće korišten uređaj za defleksijska mjerenja. Njime je moguće dobiti brzu i ponovljivu terensku karakterizaciju krutosti slojeva kolnika. Prema Rukavina (2014), upravo uređaj s padajućim teretom igra važnu ulogu u odabiru postupaka održavanja i rehabilitacije kolnika.

4.1. Podjela uređaja

Prema Rukavina i Ožbolt (2009), uređaji s padajućim teretom dijele se primarno prema težini padajućeg tereta, stoga razlikujemo lagane, standardne i teške uređaje s padajućim teretom. Svi takvi uređaji funkcioniraju i rade na jednak način, razlika je samo u težini padajuće tereta.

Lagani uređaji s padajućim teretom prijenosni su uređaji. Slika 22 prikazuje primjer laganog uređaja s padajućim teretom koje spominju Rukavina i Ožbolt (2009). Standardni i teški uređaji jednako izgledaju, samo se razlikuju u svojoj primjeri. Teški uređaju koriste se u slučajevima ispitivanja stanja kolnika kojima prometuju teža vozila, odnosno koja izdržavaju veće prometno opterećenje, kao što su na primjer kolničke konstrukcije na aerodromima. Uređaji se mogu podijeliti i prema načinu primjene impulsnog opterećenja.

Standardni i teški uređaji s padajućim teretom najčešće se nalaze na prikolici koju vuče drugo specijalizirano vozilo (Slika 23), međutim mogu se naći i kao dio posebno ugrađen u specijalno mjerno vozilo (Slika 24). Kada je uređaj ugrađen u vozilo, ima veću pokretljivost u odnosu na prikolicu, jer se cijelim vozilom lakše upravlja, odnosno manevarske sposobnosti vozila su bolje jer postoji manji polumjer okretanja vozila (Rukavina i Ožbolt, 2009). Ipak, zbog preinaka koje bi se morale napraviti kako bi se uređaj ugradio u specijalna vozila, negativne strane takve vrste uređaja očituju se u smanjenoj sigurnosti vozila, većoj razini buke za operatere vozila te težem i kompleksnijem servisiranju. Rukavina i Ožbolt

(2009) navode kako se iz tih razloga prednost treba dati uređaju s padajućim teretom ugrađenim na prikolicu.



Slika 22 Prima 100 (preuzeto s <https://www.impact-test.co.uk/products/5472-prima-100-portable-falling-weight-deflectometer/>)



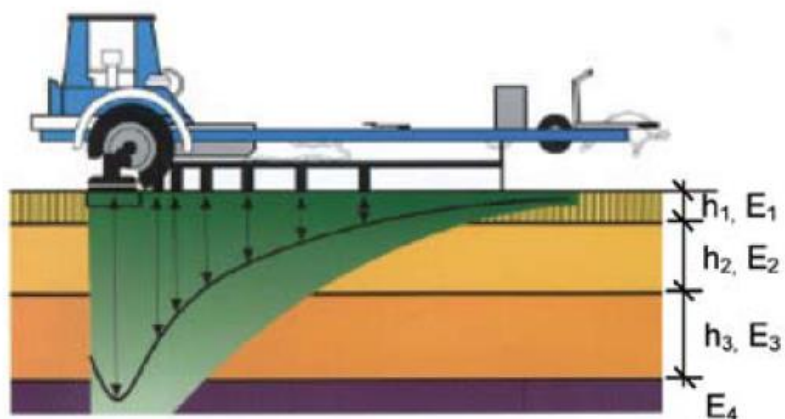
Slika 23 Uređaj s padajućim teretom montiran na prikolicu (preuzeto iz Rukavina, 2017)



Slika 24 Uređaj s padajućim teretom ugrađen u vozilo (preuzeto iz Rukavina, 2017)

4.2. Princip rada uređaja

Uređaj s padajućim sastoji se od kontrolnog sustava, utega i ploča preko koje se prenosi opterećenje, hidraulike i geofona (Rukavina, 2014). Funkcionira na principu simulacije, odnosno imitacije frekvencije i jačine kojom preko kolničke konstrukcije prelaze teretna vozila, što posljedično izaziva opterećenje na kolnik koje se izražava u obliku impulsa. Odnosno, uređaj generira opterećenje u trajanju od 25–30 milisekundi, simulirajući pokretno opterećenje vozila. Samo ispitivanje provodi se spuštanjem utega i prijenosom opterećenja preko ploče promjera od 150 ili 300 milimetara. Defleksija, odnosno odgovor konstrukcije na prezentirano opterećenje, zatim se mjeri na nekoliko točaka uzduž krivulje mjerenja (Slika 25). Mjerenje se provodi uz pomoć serije geofona (Slike 26 i 27), odnosno senzora koji mehaničko kretanje tla pretvaraju u električni signal, a koji su raspoređeni oko točke opterećenja. Geofoni mjere odgovor kolnika na opterećenje i to u obliku vertikalne deformacije ili defleksije na različitim udaljenostima od mjesta gdje je došlo do direktnog impulsnog opterećenja. Ponekad je potrebno prilagoditi udaljenost geofona, što ovisi o zahtjevima korisnika uređaja. Obično su raspoređeni na međusobnoj udaljenosti od 30 centimetara (Rukavina, 2014).



Slika 25 Princip rada uređaja (preuzeto iz Rukavina i Ožbolt, 2009)



Slika 26 Geofoni (preuzeto iz Rukavina, 2017)



Slika 27 Geofoni (preuzeto iz Rukavina, 2014)

4.3. Provođenje ispitivanja

Mjerenja uređajem s padajućim teretom izvode se neovisno o nekim drugim ispitivanjima ili mjerenjima svojstava kolnika i zato možemo reći da su pojedinačna (Rukavina i Ožbolt, 2009).

Prije samog ispitivanja potrebno je provesti regulaciju prometa ili osigurati pratnju specijalnom vozilu. Lokacija mjerenja odabire se na temelju prethodnih inspekcija i analize podataka, kao i prema potrebi, s obzirom na stanje kolničke konstrukcije. Mjerenja se najčešće provode na najizloženijim dijelovima kolnika, odnosno u kolotrazima kotača vozila. Ipak, ispitivanja je potrebno provoditi i na zaustavnom traku zbog njegove drugačije konstrukcije.

Mjerenja uređajem s padajućim teretom se ponavljaju nekoliko puta – najčešće četiri (Rukavina, 2017). Prvo je mjerenje pripremno, a podaci prikupljeni ostalim mjerenjima kasnije se koriste za analizu podataka. Izvode se na nekoliko točaka duž same konstrukcije kako bi se dobio prosjek, odnosno realna slika stanja velike površine kolnika te kako bi analiza stanja kolnika bila reprezentativna. Uz interpretaciju rezultata važno je u obzir uzeti, dakle i bilježiti tijekom samog mjerenja, temperaturu zraka i temperaturu površine kolnika (Rukavina, 2014). Nakon mjerenja i prikupljenih podataka o temperaturi, podaci se analiziraju kako bi se dobila ocjena strukturalne nosivosti kolnika. Analiza najčešće uključuje korištenje matematičkih modela i računalnih programa, a slijedi izrada izvješća. Rezultati mjerenja i sama analiza se, dakle, prikazuju u izvješću koje sadrži preporuke za održavanje, popravke ili rekonstrukciju kolnika. Izvješće također može uključivati predviđanja budućih performansi kolnika i planove za preventivno održavanje.

Ispitivanja uređajem s padajućim teretom provode se na postojećim kolnicima u različitim eksploatacijskim uvjetima, što posljedično utječe na iznos izmjerene deformacije. Na vrijednost defleksije, odnosno na rezultate mjerenja, prema Rukavina (2014), najviše utječu: debljina slojeva konstrukcije, vrsta i kvaliteta materijala slojeva, nosivost posteljice, postojeća oštećenja konstrukcije, okolinski faktori kao što je temperatura te razne druge varijacije i diskontinuiteti sastava samog kolnika.

4.4. Analiza podataka dobivenih uređajem

Podaci dobiveni na temelju mjerenja defleksija dobivenih uređajem s padajućim teretom, najčešće se interpretiraju metodom povratnih analiza, koja je prethodno opisana. Upravo je ta metoda korištena za izračun podataka analiziranih i u ovom radu.

Za interpretaciju podataka dobivenih uređajem s padajućim teretom, kao i proračun unazad, važna je adekvatna edukacija stručnjaka, no pozornost treba obratiti i na računalne programe koji se koriste. Uglavnom proizvođači pojedinačnih uređaja s padajućim teretom imaju vlastite računalne programe (kao što je to, na primjer, ELMOD), međutim postoje i programi neovisni o uređaju, kao što je COLORMAP (Rukavina i Ožbolt, 2009) ili Evercalc (Podzer, Mazić i Mihajlović, 2016). Kalibracija, odnosno podešavanje uređaja, nužno je zato što različiti računalni programi za interpretaciju rezultata imaju unesene drugačije inicijalne pretpostavke, a one se uvijek moraju prilagoditi cesti na kojoj se provodilo mjerenje.

4.5. Prednosti korištenja uređaja

Početni troškovi nabave opreme za mjerenje uređajem s padajućim teretom vrlo su visoki, no prednosti uređaja s padajućim teretom nad drugim nerazornim mjerenjima defleksije prevladavaju te visoke cijene.

Velika prednost mjerenja uređajem s padajućim teretom je činjenica da takvo mjerenje omogućava rano otkrivanje potencijalnih problema, što omogućava proaktivno planiranje održavanja i sprječavanje nekih ozbiljnijih oštećenja.

Prednosti uređaja s padajućim teretom očituju se u većoj brzini mjerenja i točnosti dobivenih podataka. Naime, mjerenja ovim uređajem pružaju točne i pouzdane podatke o strukturnom stanju kolnika, omogućujući preciznu procjenu nosivosti i identifikaciju problematičnih područja na kolniku. Također, precizni podaci o stanju kolničke konstrukcije omogućuju bolje planiranje i raspodjelu dostupnih resursa, što rezultira optimizacijom troškova održavanja i popravaka. Posljedično, prednost mjerenja uređajem s padajućim teretom leži u tome što redovita mjerenja i održavanje na temelju dobivenih podataka poboljšavaju sigurnost kolnika, samim time smanjujući rizik od prometnih nesreća uzrokovanih oštećenim kolnikom. Korištenjem defleksijskih mjerenja, cestovne uprave mogu osigurati dugoročno održavanje i očuvanje cestovne infrastrukture, time produžujući njezin vijek trajanja i osiguravajući pouzdaniju prometnu mrežu.

Nadalje, nužno je da osoblje koje rukuje uređajem s padajućim teretom te kalibrira, a kasnije i interpretira dobivene podatke, bude adekvatno educirano, što nije uvijek najjednostavnije s organizacijskog stajališta. Ipak, vrijedno je jer se rezultati dobiveni mjerenjem uređajem s padajućim teretom mogu koristiti za mnogo detaljnije analize no što je to slučaj kod uporabe drugih nerazornih metoda mjerenja defleksije (Rukavina i Ožbolt, 2009).

Ukratko, defleksija kolnika ključni je pokazatelj strukturalnog stanja kolničke konstrukcije, a mjerenja defleksije uređajem s padajućim teretom pružaju dragocjene informacije stručnjacima koje se analiziraju te posljedično pomažu u donošenju odluke bitne za održavanje i planiranje budućih aktivnosti na samome kolniku.

5. OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA PRIMJERU DIONICE AUTOCESTE A2

Autocesta Zagreb-Macelj laicima je poznata kao i „Zagorska autocesta“. Naime, dio je hrvatskog auto-cestovnog sustava koja povezuje Zagreb s granicom Slovenije te prolazi kroz Hrvatsko Zagorje. Ta autocesta predstavlja ključnu vezu između Hrvatske i Slovenije, čime je važan dio međunarodnog koridora prema srednjoj Europi, kao i dio Phyrinskog cestovnog pravca, koji se odvija na relaciji : Nürnberg – Graz – Maribor – Zagreb. U mreži hrvatskih cesta ova cesta nosi oznaku A2. Ukupna duljina autoceste danas iznosi 59.2 kilometara. Važno je napomenuti kako dozvoljena brzina vožnje na ravničarskim dijelovima danas iznosi 130 km/h, a na brežuljkastim dijelovima, tunelima i nadvožnjacima iznosi 100 km/h.

Izgradnja autoceste A2 počela je još 1990. godine, izgradnjom prve etape Jankomir - Zaprešić duljine 7,4 kilometara. Već 1991. godine izgrađena je dionica Zaprešić - Zabok duljine 17 kilometara, dok je dionica Zabok – Velika Ves (Krapina), duljine 16,2 kilometra, sagrađena pet godina kasnije. Između 2004. i 2007. godine dovršene su tada neizgrađene dionice autoceste. Završetkom tih radova autocesta A2 poprima svoj konačni oblik.

27. ožujka 2003. godine, odlikom Vlade Republike Hrvatske, osnovano je društvo „Autocesta Zagreb – Macelj“ d.o.o. s ciljem daljnjeg financiranja, izgradnje, upravljanja te pravilnog održavanja spomenute autoceste. Društvo 2004. godine povjerilo je upravljanje autocestom društvu Egis Road Operation Croatia d.o.o.. Ubrzo po osnivanju, Društvo je djelomično privatizirano po modelu javno-privatnog partnerstva, što znači da Republika Hrvatska ima 49%, dok Pyhrn Concession Holding GmbH ima 51% udjela u istome.

Svi gore navedeni podaci preuzeti su iz službenih izvještaja tvrtke TPA za održavanje kvaliteta i inovacija d.o.o., s kojom je grad Zagreb 13. srpnja 2015. godine sklopio ugovor o projektu u okviru kojeg je bilo potrebno provesti analizu stanja postojećeg kolnika autoceste A2 te izraditi program sanacije, odnosno plan obnove kolničkih konstrukcija na određenim dionicama autoceste. Predviđeni su radovi poput vizualnog pregleda, nerazornih mjerenja nosivosti, ispitivanja ravnosti, hvatljivosti i teksture površine kao i laboratorijska ispitivanja i mjestimična razorna uzorkovanja.

Kao što je već navedeno, ukupna dužina ceste iznosi 59.2 kilometara. Za potrebe analiziranja svojstava ceste, A2 je podijeljena u homogene dionice. Prema TPA, dionice su definirane kako slijedi:

- dionica A (od km 0+470 m (čvorište Jankomir) do km 10+090 m (čvorište Zaprešić), uključujući čvorište Zaprešić, ukupna duljina = 9620 m)

- dionica B1 (od km 10+580 m (čvorište Zaprešić) do km 24+100 m (čvorište Zabok), uključujući čvorište Zabok, ukupna duljina = 13520 m)
- dionica B2 (od km 25+400 m (čvorište Zabok) do km 42+450 m (čvorište Krapina), uključujući čvorište Sveti Križ Začretje i čvorište Krapina, ukupna duljina = 17050 m)
- dionica C (od km 42+500 m (čvorište Krapina) do km 58+900 m (čvorište Trakošćan), uključujući čvorište Đurmanec i čvorište Trakošćan, ukupna duljina = 16400 m)

Ovom će diplomskom radu detaljnije biti prikazana strukturalna svojstva dionice B2 autoceste A2. Važno je napomenuti da dionica B2 na sebi nema značajnih objekata poput mostova ili tunela, jer bi postojanje istih zahtijevalo drugačiji izračun pa stoga i drugačije ocjene strukturalnih svojstava kolnika na dionici B2.

5.1. Prikupljanje podataka

Prema navodima tvrtke TPA, projektnim su zadatkom bila definirana terenska ispitivanja koja uključuju:

- vizualni pregled površine kolnika,
- određivanje nosivosti postojeće kolničke konstrukcije interpretacijom rezultata mjerenja uređajem s padajućim teretom (eng. *Falling Weight Deflectometer*; FWD)
- određivanje debljine i sastava postojeće kolničke konstrukcije georadarom (eng. *Ground Penetrating Radar*; GPR)
- ispitivanje uzdužne ravnosti vozne i preticajne trake u punoj duljini
- ispitivanje poprečne ravnosti, odnosno dubine kolotraga
- ispitivanje otpornosti na klizanje (hvatljivosti) i dubine teksture postojećeg habajućeg asfaltnog sloja

Unatoč opsežnim nedestruktivnim istraživanjima provedenim na terenu, na određenim je lokacijama bilo nužno izvesti istražne bušotine i iskopati probne jame kako bi se uređaji za nerazorna ispitivanja mogli precizno baždariti. Uzorci su pažljivo uzeti iz asfaltnih slojeva motorom bušilicom, što je prikazano Slikama 28 i 29, a potom su analizirani kako bi se točno odredile debljine pojedinih slojeva kolničke konstrukcije. Ovakav pristup omogućio je preciznu kalibraciju mjernih uređaja i detaljno razumijevanje stratigrafije asfaltnog sloja.



Slika 28 Uzorkovanje kolnika 1 (preuzeto iz Rukavina, 2014)



Slika 29 Uzorkovanje kolnika 2 (preuzeto iz Rukavina, 2014)

Podaci o strukturi kolnika prikupljeni uređajem s padajućim teretom osnova su ovog rada, međutim, značajnu ulogu imaju i rezultati dobiveni primjenom georadara.

Georadar je važan alat koji se koristi u istraživanju podzemnih struktura i uvjeta. To je uređaj koristi radarske impulse kako bi stvorio sliku podzemlja, pružajući vrijedne informacije o

sastavu tla, prisutnosti objekata ili struktura, te drugim potencijalno važnim detaljima. Korištenje georadara nerazorna je metoda ispitivanja koja se bazira na svojstvu refleksije elektromagnetskih valova na granici dviju sredina različitih električnih karakteristika (AL-Qadi i Lahouar, 2005).). Georadarom se mjeri tako da se kontinuirano pomiče antena neposredno iznad tla. Dio valova reflektira se na granici različitih medija, dok ostatak prodire kroz njegovu strukturu. Valovi koji se uspješno vrate do uređaja analiziraju se mjerenjem njihove amplitude i vremena potrebnog za povratak. Na temelju tih podataka precizno se određuju debljine pojedinih slojeva. Rezultati mjerenja obrađuju se uz pomoć računalnih programa koji ih vizualiziraju u obliku dijagrama i pružaju potrebne informacije za daljnju analizu.

Na dionici B2 autoceste A2, ispitivanje georadarom provedeno je u oba smjera, pokrivajući svaki kolnik u tri trake – voznu, zaustavnu i preticajnu. Kako bi se osigurala maksimalna preciznost i reprezentativnost podataka, radar je bio pozicioniran u osi traka ceste.

Radar je omogućavao mjerenja do dubine od 70 centimetara, a prikupljeni podaci dodatno su kalibrirani uz pomoć prethodno spomenutih sondiranja prometnice. Ipak, debljina nevezanog nosivog sloja nije mogla biti točno određena zbog ograničenja radara u pogledu dubine. Stoga se debljina ovog sloja interpretira kao okvirni prostor čija vrijednost ovisi o parametrima definiranim od strane korisnika programa ELMOD.

Kao što je već spomenuto, ovaj pristup omogućuje povezivanje podataka dobivenih mjerenjem georadarom s rezultatima mjerenja uređajem s padajućim teretom, čime se osigurava dublje razumijevanje stanja konstrukcije prometnice.

5.2. Ocjena strukturalnog stanja na temelju vrijednosti modula

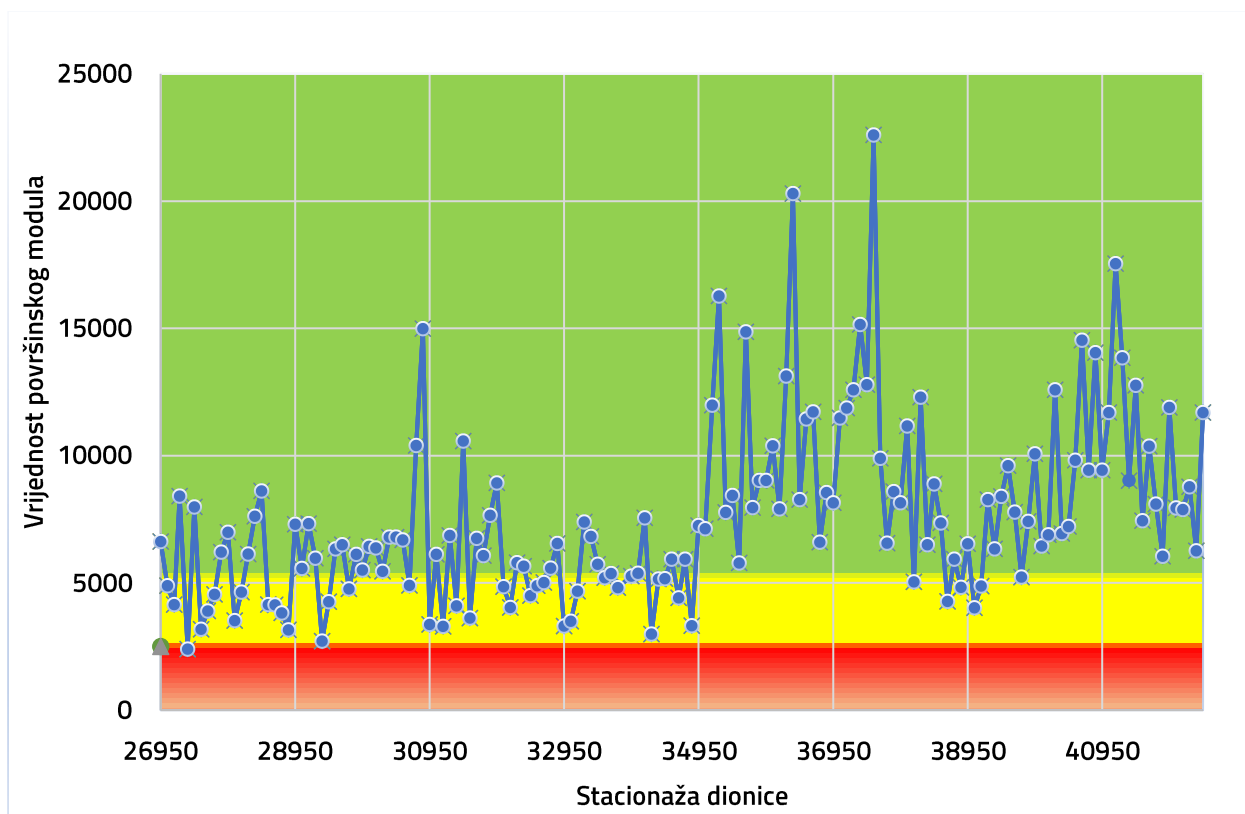
Za analizu nosivosti dionice autoceste A2 (Zagreb–Macelj) korišten je prethodno spomenuti računalni program ELMOD 6. Povratnim analizama provedenima u programu dobivene su vrijednosti modula, koje su prikazane dijagramima (Slike 30–33), dok su detaljniji podaci dostupni u Prilogu 2..

Na kraju ovog odlomka prikazana je Tablica 3, koja prikazuje ocjene strukturalnog stanja kolnika prema ASFİNAG-ovim kriterijima, koje su referentna točka prikaza stanja kolnika u spomenutim dijagramima. U dijagramima su crvenom bojom označena područja s lošim strukturalnim stanjem kolnika, žutom bojom prikazano je dobro stanje, dok zelena boja označava vrlo dobro stanje kolnika. Dobiveni rezultati u nastavku rada bit će uspoređeni s

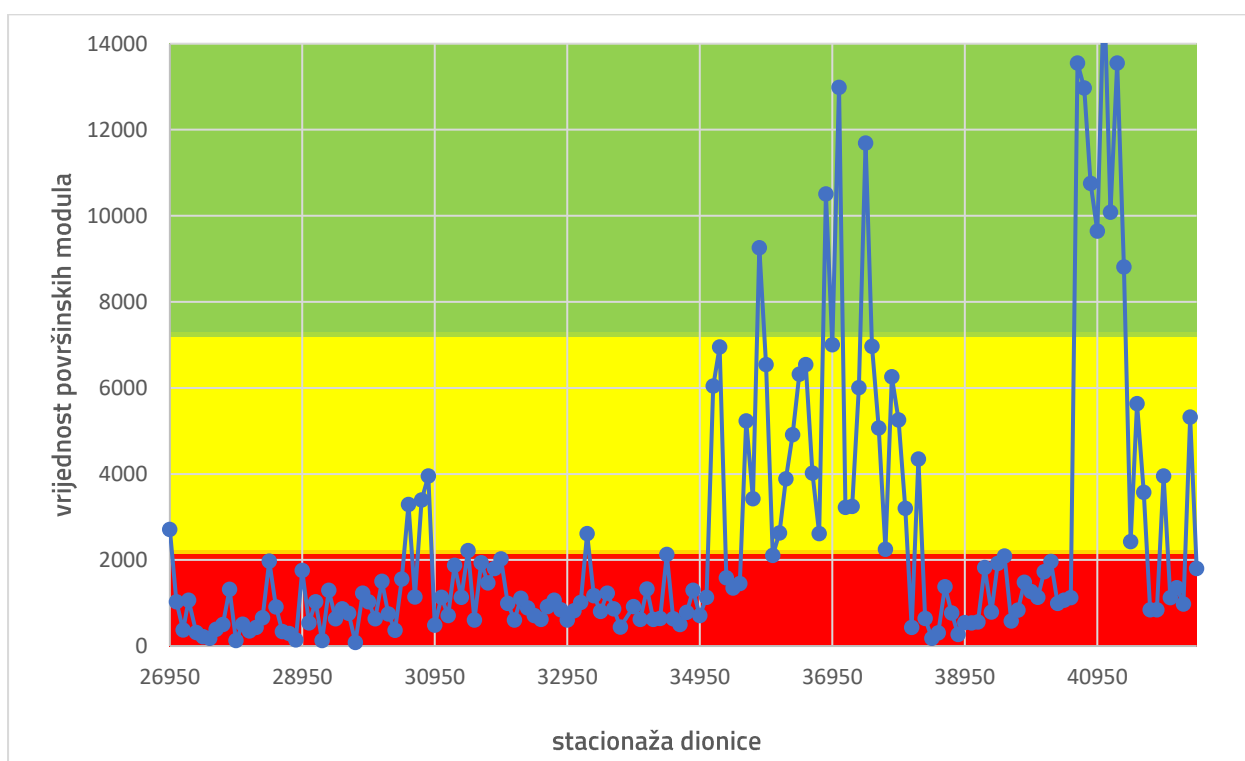
rezultatima tradicionalne metode ocjene strukturalnog stanja kolnika, koja se temelji na vrijednostima indeksa nosivosti.

Tablica 3 Dobivene vrijednosti o strukturnom stanju kolnika (izradio autor)

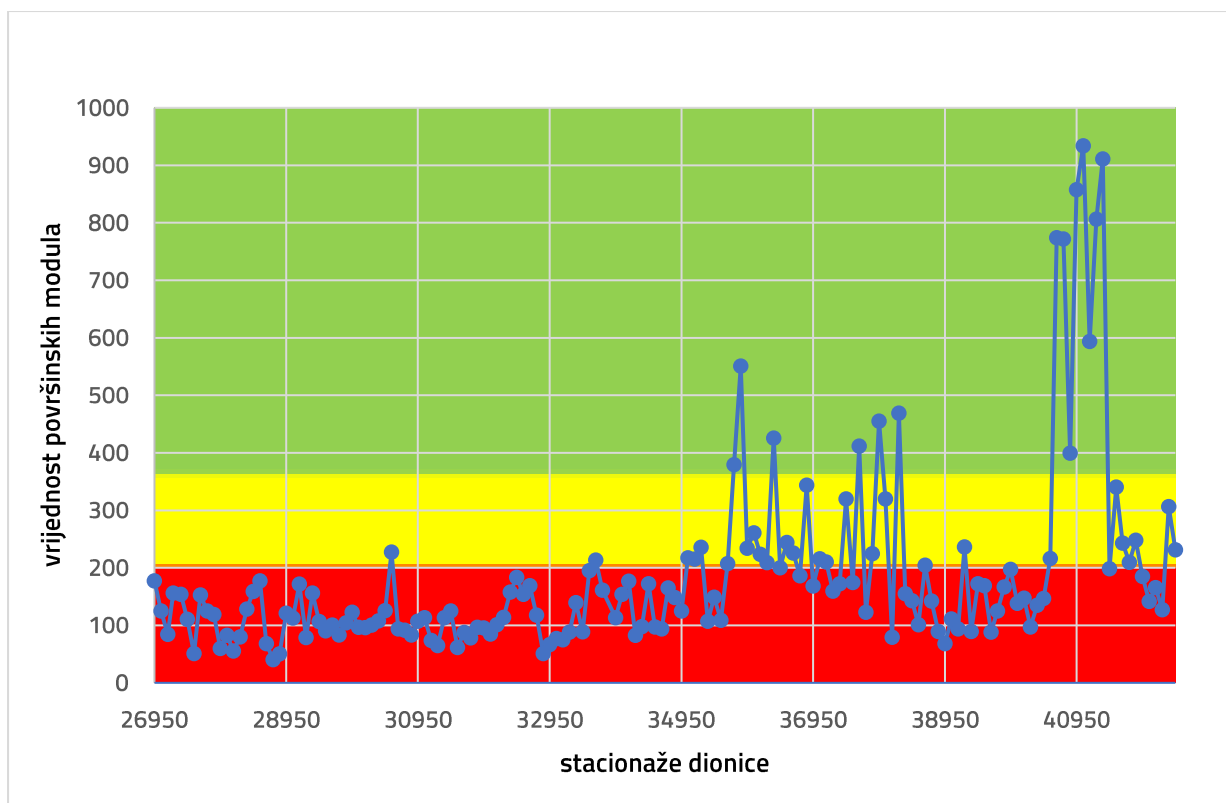
VRSTE SLOJA PROMETNICE	POSTOTAK	OCJENA STRUKTURNOG STANJA KOLNIKA
asfaltni slojevi	77.41% 21.94% 0.65%	vrlo dobro stanje dobro stanje loše stanje
hidrauličkim vezivom vezani nosivi sloj – CNS	8.39 % 23.87% 67.74%	vrlo dobro stanje dobro stanje loše stanje
nevezani, mehanički zbijeni nosivi sloj – MNS	9.04 % 18.06 % 72.9 %	vrlo dobro stanje dobro stanje loše stanje
posteljica	18.7 % 60.65 % 20.65 %	vrlo dobro stanje dobro stanje loše stanje.



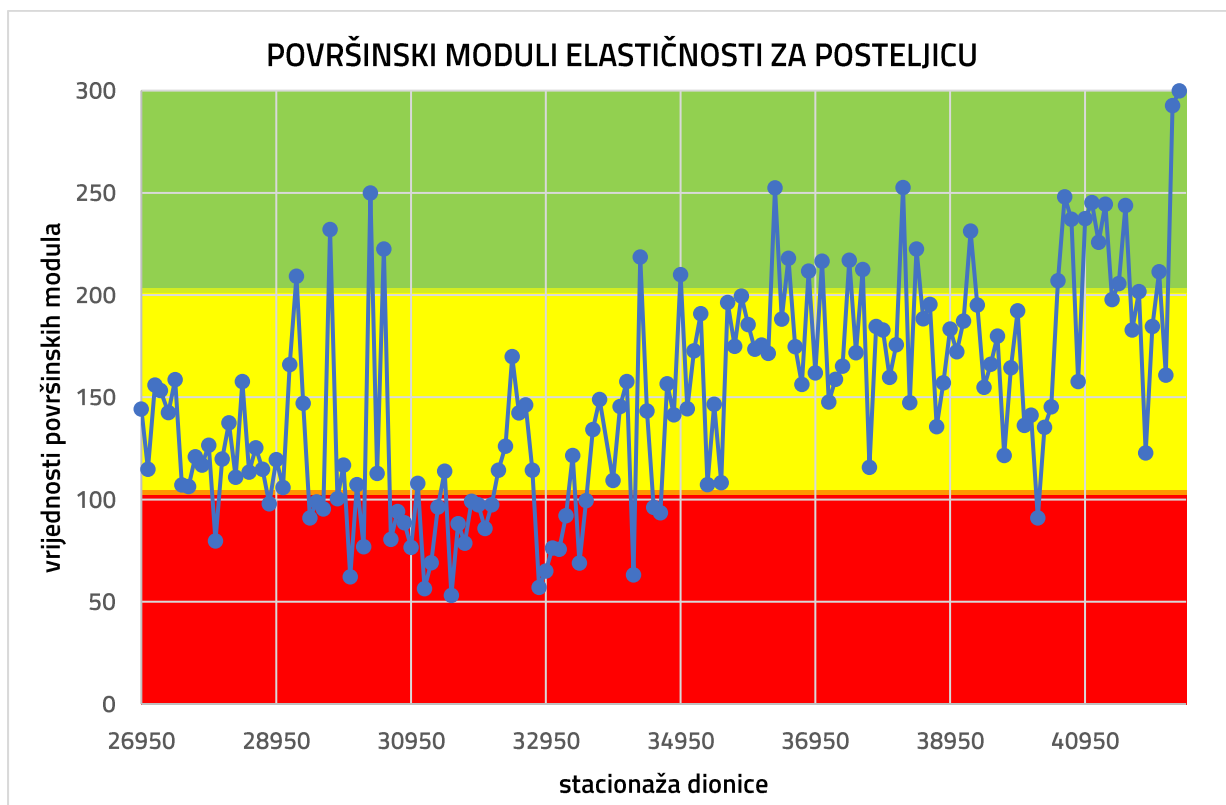
Slika 30- Površinski moduli elastičnosti za asfaltni sloj (izradio autor)



Slika 31 - Površinski moduli elastičnosti za CNS (izradio autor)



Slika 32 Površinski moduli elastičnosti za MNS (izradio autor)



Slika 33 - Površinski moduli elastičnosti za posteljicu (izradio autor)

Prosječni rezultati modula elastičnosti nakon odrađene metode povratne analize su iznosili:

- 7572.55 za asfaltni sloj,
- 2539.03 za cementom stabilizirani sloj,
- 187.12 za mehanički zbijeni nosivi sloj,
- 152.37 za posteljicu.

Na temelju navedenog može se zaključiti da prosječna vrijednost modula elastičnosti asfaltnog sloja ukazuje na njegovo vrlo dobro stanje. S druge strane, većina CNS-a, MNS-a i posteljice nalazi se u lošem stanju.

5.3. Ocjena strukturalnog stanja na temelju vrijednosti indeksa nosivosti

Na predmetnoj dionici, kolnička konstrukcija sastojala se od asfaltnih slojeva, cementom stabiliziranog nosivog sloja, mehanički zbijenog nosivog sloja i posteljice. U ovoj kombinaciji slojeva, dominantnim nosivim slojem smatra se cementom stabilizirani nosivi sloj.

Budući da se granične vrijednosti indeksa nosivosti za ocjenu strukturalnog stanja određuju prema Tablici 2 za kolničku konstrukciju s cementom stabiliziranim nosivim slojem, za ocjenu strukturalnog stanja pojedinih slojeva odabrani su sljedeći indeksi:

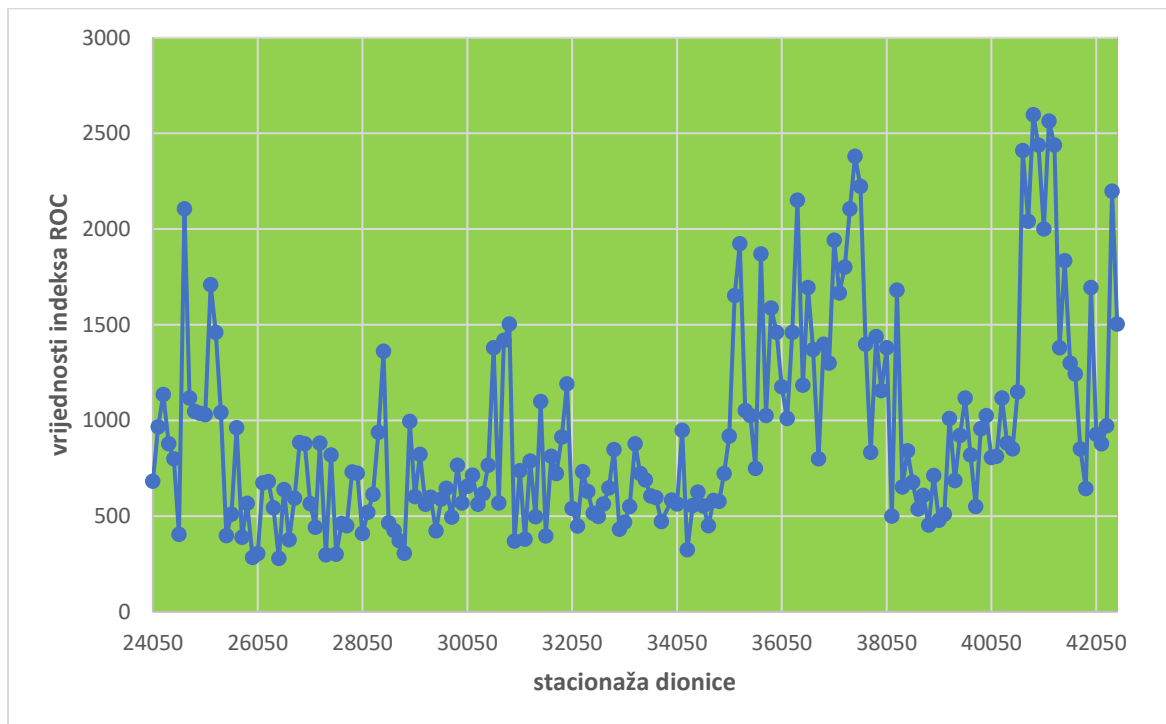
- Asfaltni slojevi - ROC
- Cementom stabilizirani nosivi sloj - BLI
- Mehanički zbijeni nosivi sloj - MLI
- Posteljica - LLI

Na temelju graničnih vrijednosti prikazanih u Tablici 2 i izračunatih indeksa nosivosti određen je postotak strukturalnog stanja svakog sloja kolničke konstrukcije. Mjerodavne defleksije korištene za izračun indeksa nosivosti uzete su pri trećem padu, što je detaljno prikazano u Tablici 4. Ova tablica odnosi se isključivo na treći - mjerodavni pad uređaja, pružajući precizan uvid u strukturalno stanje pojedinih slojeva kolničke konstrukcije.

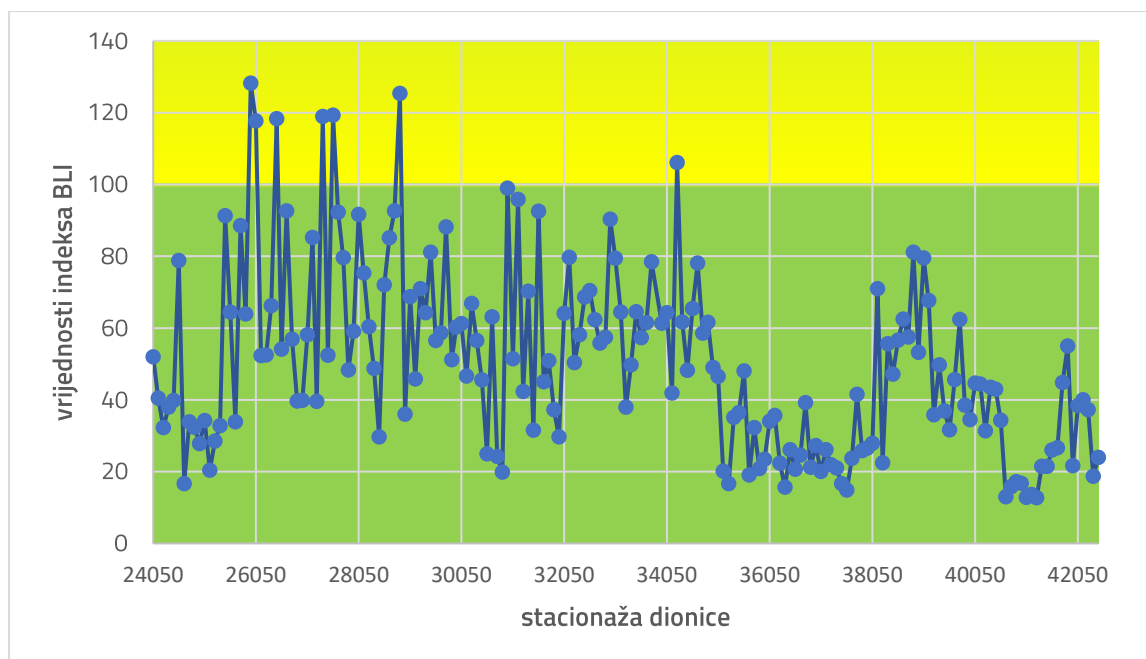
Tablica 4 Izračun ocjene strukturalnog stanja za defleksije izmjerene u padu 3 (izradio autor)

VRSTA SLOJA PROMETNICE	POSTOTAK	OCJENA STRUKTURNOG STANJA KOLNIKA
asfaltni slojevi	100.00% 0.00% 0.00%	dobro upozoravajuće loše stanje
Cementom stabilizirani nosivi sloj	96.20% 3.8% 0.00%	Dobro Upozoravajuće Loše stanje
Mehanički zbijeni nosivi sloj	42.93% 48.37% 8.7%	dobro upozoravajuće loše stanje
posteljica	53.8% 45.11% 1.09%	Dobro Upozoravajuće loše stanje

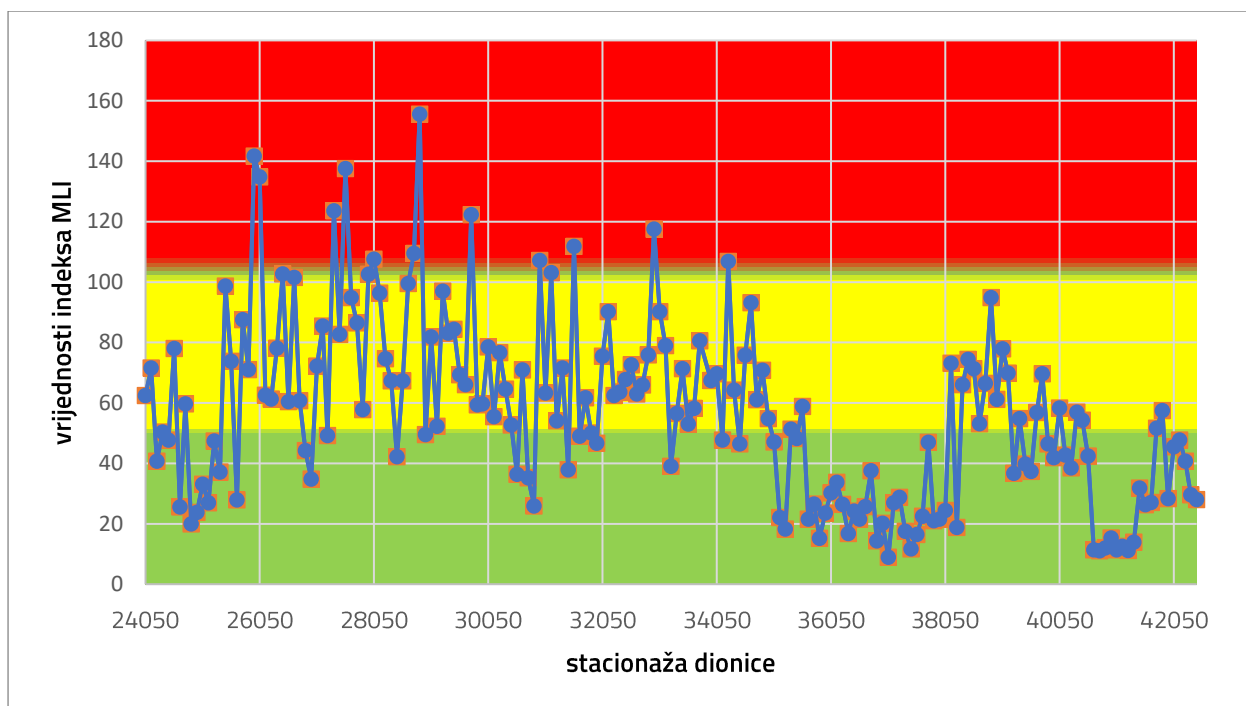
Prema ranije spomenutim Pravilniku, vrijednosti trećeg pada uzimaju se kao mjerodavne vrijednosti. Sljedeće slike (34 – 39) prikazuju vrijednosti dobivene kroz proračun indeksa za pojedine slojeve nakon trećeg pada.



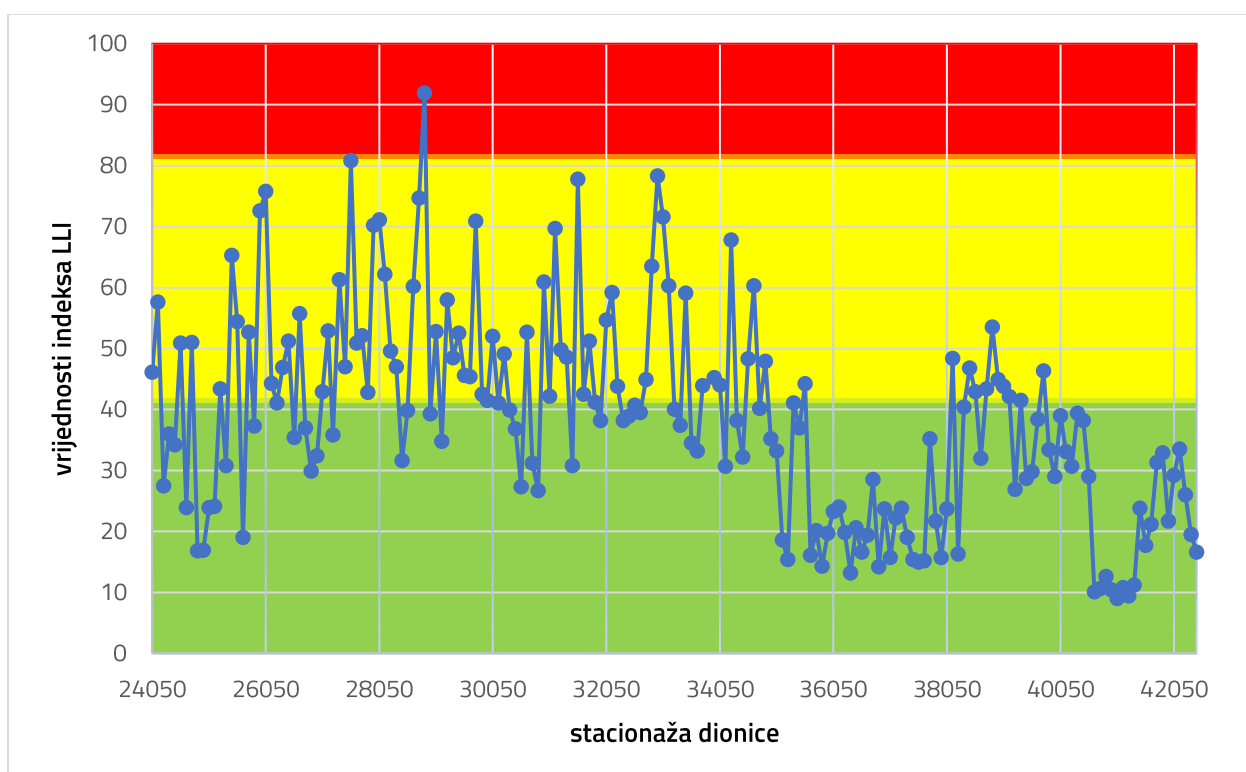
Slika 34- Ocjena strukturalnog stanja asfaltnog sloja (izradio autor)



Slika 35 Ocjena strukturalnog stanja CNS-a (izradio autor)



Slika 36 Ocjena strukturalnog stanja MNS-a (izradio autor)



Slika 37 Ocjena strukturalnog stanja posteljice (izradio autor)

Prosječne vrijednosti dobivene primjenom metode indeksa nosivosti opisuju stanje slojeva kolničke konstrukcije na sljedeći način:

Prosječna vrijednost indeksa LLI iznosi 38,6, što ukazuje na to da je stanje posteljice u prosjeku dobro. Ova vrijednost pokazuje da posteljica pruža adekvatnu potporu i nosivost kolnika, što je neophodno za stabilnost ceste.

Indeks MLI iznosi 56,9, iz čega se može zaključiti da je stanje MNS-a ocijenjeno kao upozoravajuće. Srednja vrijednost indeksa BLI iznosi 50.24 % i ocjenjuje cementni nosivi sloj kao dobar. Nadalje, indeks ROC sa prosječnom vrijednosti od 938, ukazuje na to kako je asfaltni sloj također u dobrom stanju. Vrijednost indeksa MLI znači da je potrebno daljnje praćenje nosivosti tog sloja kako bi se izbjegla moguća oštećenja u budućnosti.

U sljedećem poglavlju bit će detaljno objašnjena usporedba dobivenih podataka između različitih metoda analize, kako bi se bolje razumjeli rezultati i stabilnost slojeva ceste, što može pomoći kod donošenja odluka vezanih uz održavanje ili obnovu kolničke, odnosno cestovne infrastrukture.

5.4. Usporedba ocjene stanja kolnika prema različitim metodama

Usporedbu metode povratnih analiza i metode indeksa temelje se na prosječnim vrijednostima, iz čega mogu izvući sljedeći zaključci:

Za asfaltne slojeve, metodom indeksa dobiven je rezultat koji pokazuje da je 100% asfaltnog sloja kolnika u vrlo dobrom strukturnom stanju. Međutim, prema metodama povratnih analiza, rezultati su nešto lošiji. Naime, prema podacima dobivenim metodom povratnih analiza, samo 77,41% kolnika nalazi se u vrlo dobrom stanju, dok je tek 21,94% u dobrom stanju.

Za mehanički zbijene nosive slojeve, metodom indeksa utvrđeno je da je 42,93% sloja u dobrom stanju, dok je prema metodama povratnih analiza taj postotak znatno manji, odnosno on iznosi samo 9,04%. Kada usporedimo postotke kolnika u lošem stanju prema obje metode, razlika je čak 64.2%.

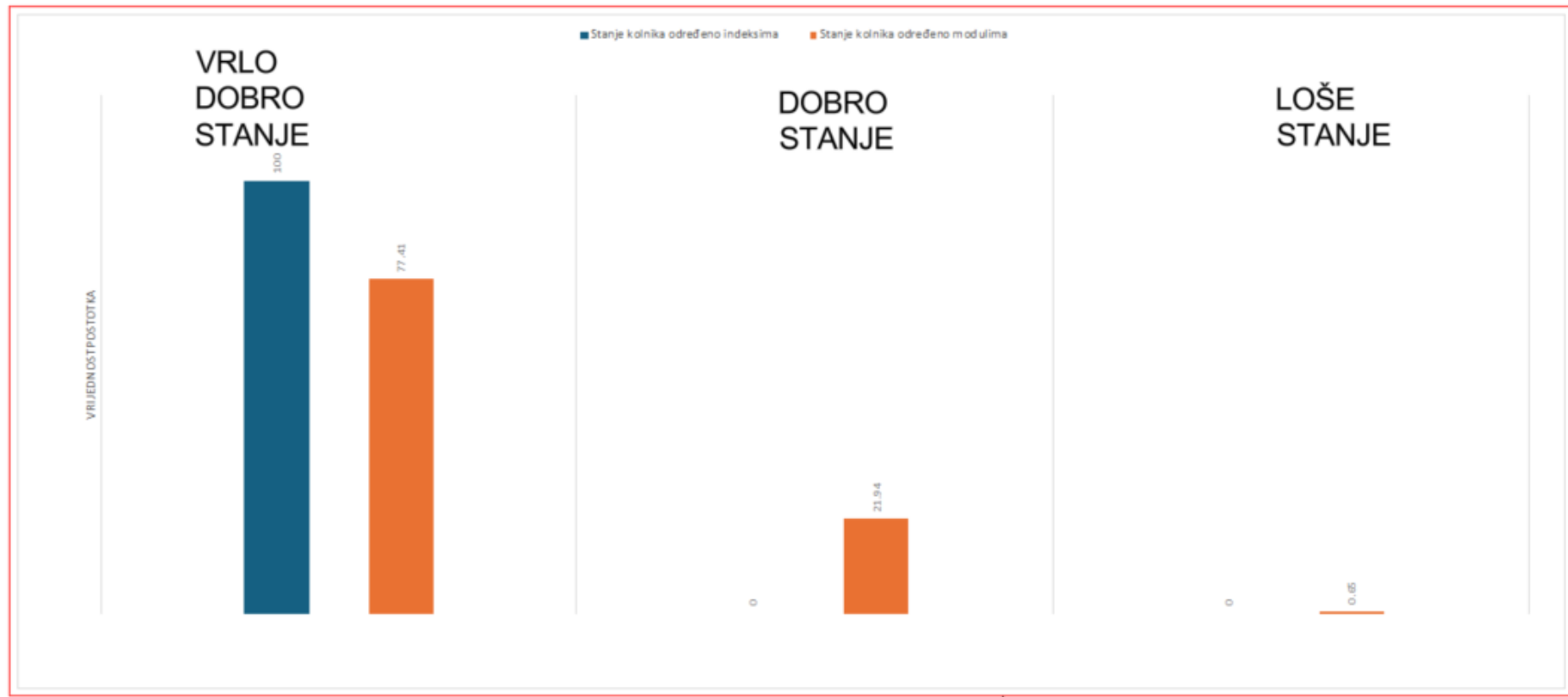
Za cementom stabilizirane nosive slojeve, kao i kod prethodno analiziranih slojeva, najveća razlika pojavljuje se u postotku kolnika u lošem stanju. Ovdje razlika iznosi čak 67,74%.

Slojevi posteljice također ukazuju na razlike u rezultatima, ali ipak u nešto manjoj mjeri u usporedbi s prethodno opisanim slojevima.

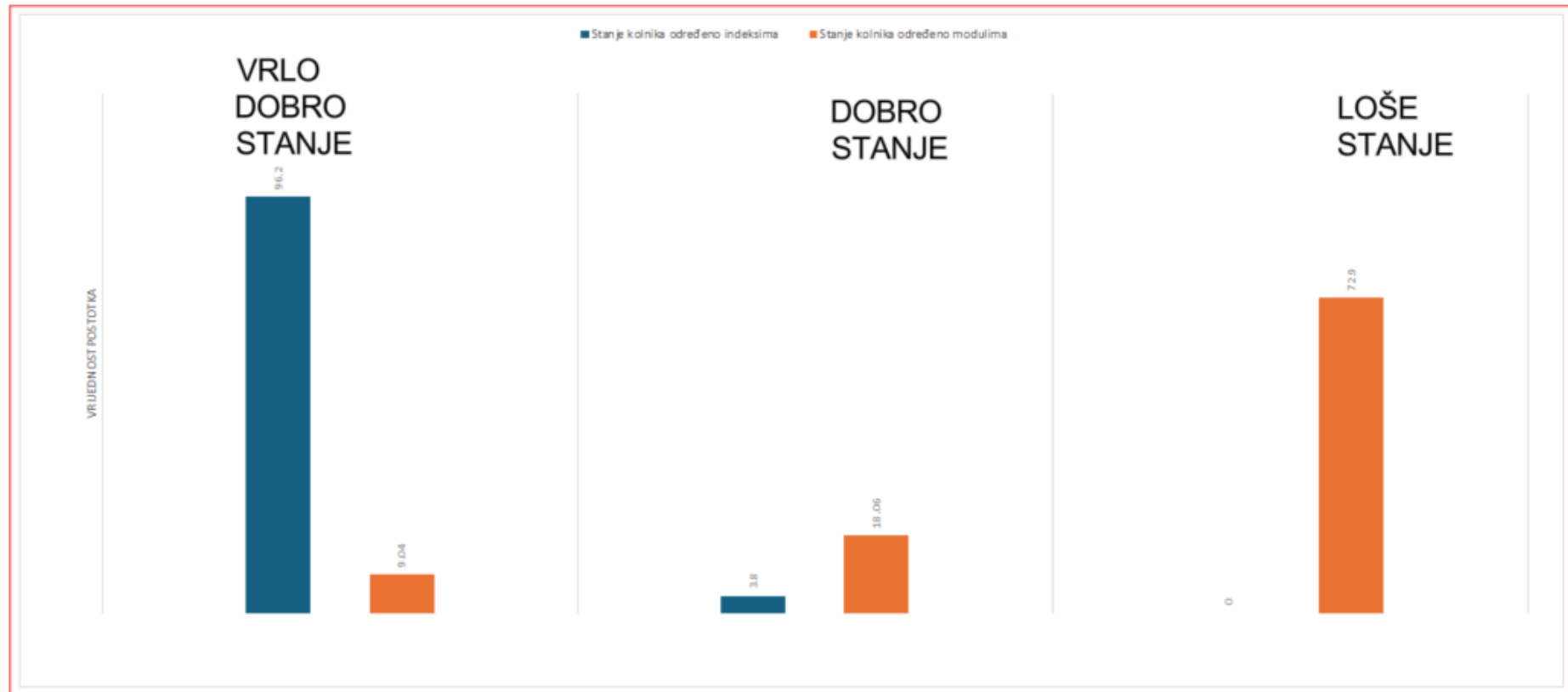
Usporedivši dijagrame istovjetnih slojeva za obje metode vidljivo je kako se područja u kojima su slojevi u boljem stanju i lošem stanju poprilično poklapaju, što potvrđuje njihovu baziranost na istim podacima defleksija i mjerenja, ali također razlike u njihovim vrijednostima pokazuju razliku metoda. Razliku metoda ćemo prikazati stupčastim dijagramima koji slijede.

Indeksi mogu poslužiti kao korisno sredstvo za otkrivanje slabih dijelova kolničke konstrukcije, no važno je naglasiti kako metodi indeksa nedostaje prilagodljivost različitim područjima, vrstama tla i klimatskim uvjetima. Budući da su razvijeni u Južnoafričkoj Republici, potrebno je indekse koristiti s oprezom prilikom analize strukturalnog stanja kolnika u našim uvjetima. Upravo razlike u klimatskim uvjetima, geološkim karakteristikama tla i prometnim opterećenjima mogu značajno utjecati na pouzdanost dobivenih rezultata. Analizirajući sve dostupne podatke i uspoređujući ih sa stvarnim stanjem, može se zaključiti kako je metoda povratnih analiza ipak pouzdanija te bolje prilagođena specifičnostima našeg područja, kao i svakom drugom specifičnom lokalitetu.

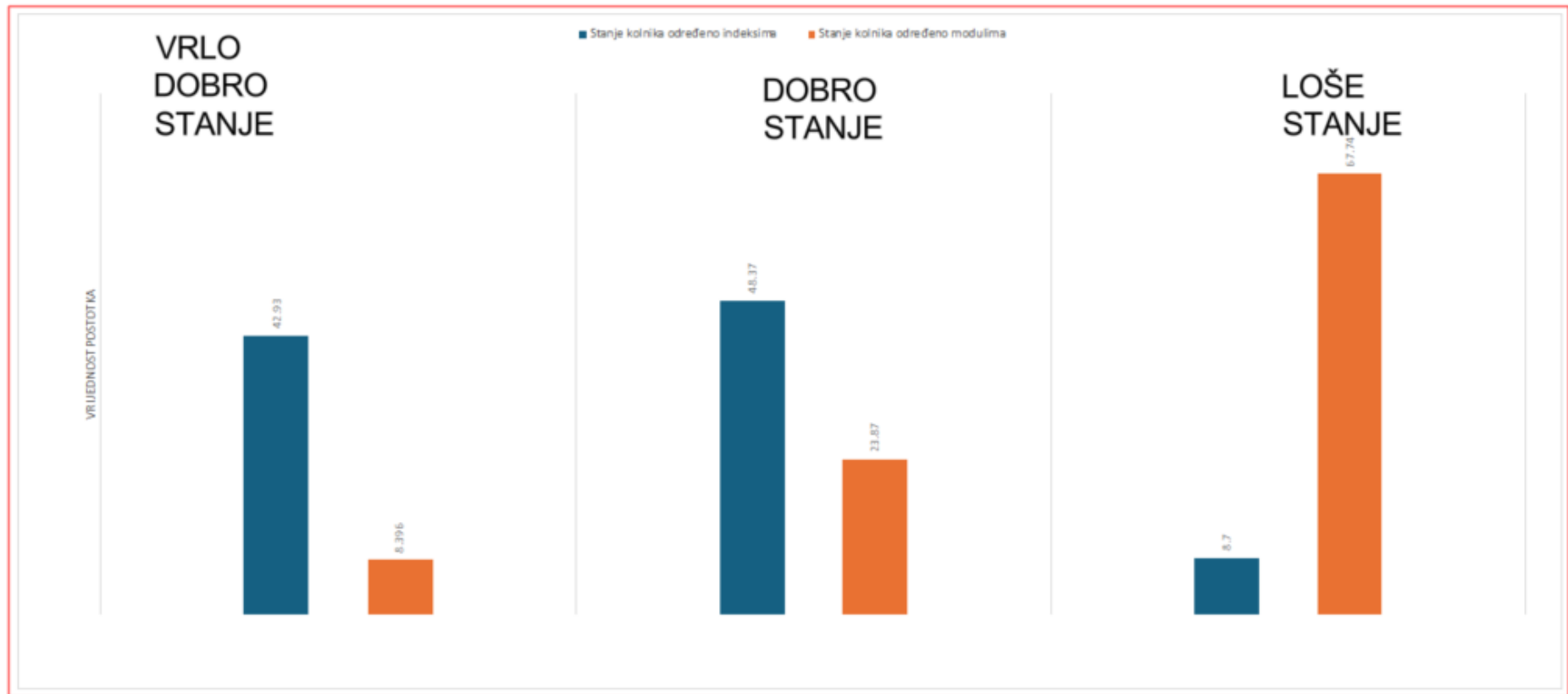
OCJENA NOSIVOSTI KOLNIKA NA PRIMJERU DIONICE AUTOCESTE A2



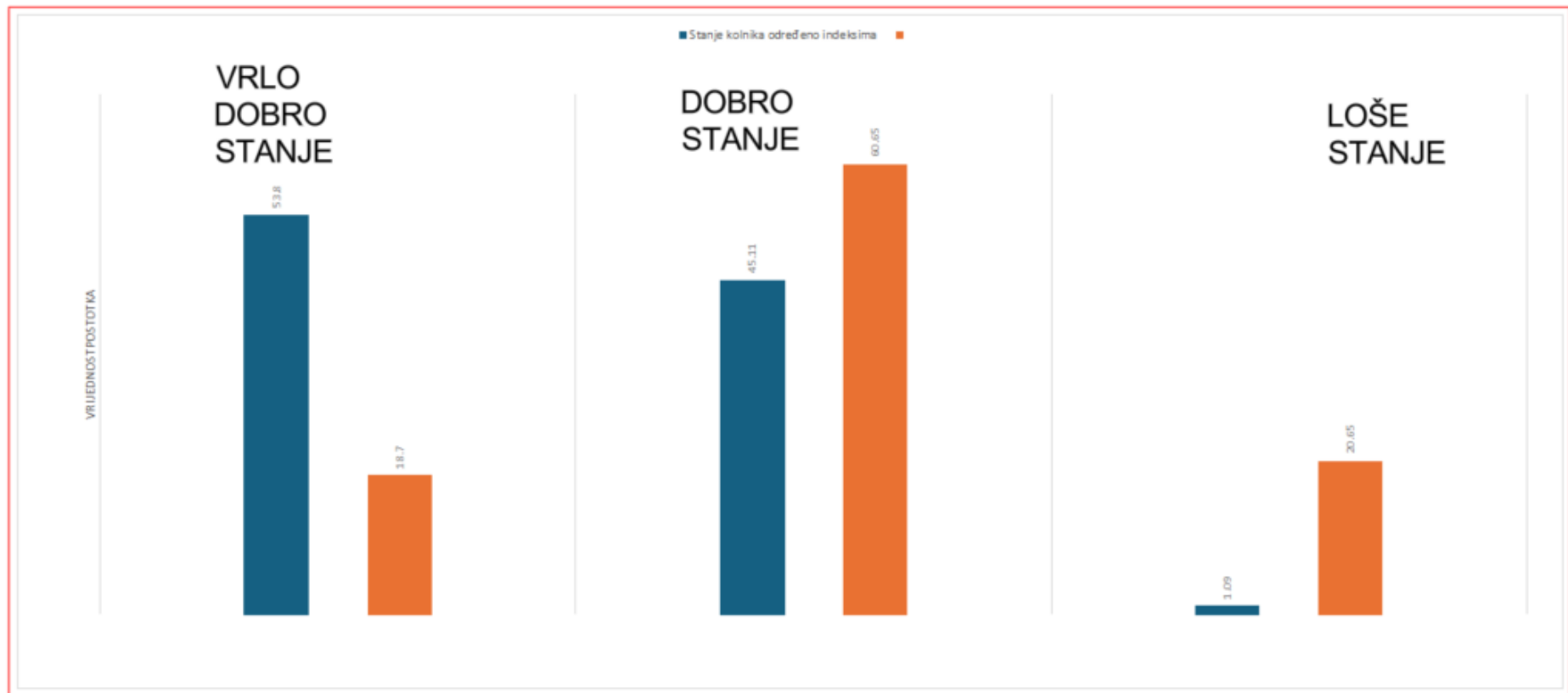
Slika 38 Usporedba ocjene stanja kolnika za asfaltni sloj (izradio autor)



Slika 39 Usporedba ocjene stanja kolnika za CNS (izradio autor)



Slika 40 Usporedba ocjene stanja kolnika za MNS (izradio autor)



Slika 4.1 Usporedba ocjene stanja kolnika za posteljicu (izradio autor)

6. ZAKLJUČAK

Neosporno je kako su prometnice danas jedan od neophodnih aspekata ljudskog života. Bez njih, način života kakvog poznajemo i živimo bio bi gotovo pa nemoguć. Upravo iz tog razloga održavanje cesta postaje ključno za našu svakodnevicu. Iz godine u godinu značajno raste obujam prometa, a i brzina kojom se vozi, što čini preventivno održavanje cesta još važnijim. Osim toga, i aspekt predviđanja životnog vijeka cesta važan je kako bi se pravovremeno interveniralo i kako bi se što uspješnije spriječili potencijalni problemi.

U ovom radu uspoređene su dvije često korištene metode za ocjenu strukturalnog stanja kolnika. Iako obje imaju svoje prednosti, zaključeno je kako je metoda modula izračunata povratnim analizama znatno pouzdanija. Ipak, važno je napomenuti da taj zaključak možda neće biti univerzalno primjenjiv u svim dijelovima svijeta, jer različiti klimatski uvjeti i specifičnosti nekih terena mogu utjecati na pouzdanost metoda.

Jedan od razloga razlika u rezultatima analize leži i u samim kategorijama koje svaka metoda koristi. Metoda indeksa procjenjuje stanje slojeva kroz kategorije "dobro", "upozoravajuće" i "loše", dok metoda povratnih analiza koristi kategorije "vrlo dobro" i "loše". Za potrebe ovog istraživanja pretpostavljeno je da kategorija "dobro" u metodi indeksa odgovara kategoriji "upozoravajuće", što možda nije potpuno precizno i moglo je utjecati na konačne rezultate usporedbe.

Metoda povratnih analiza, koja se temelji na najnovijim tehnologijama, nudi brojne prednosti. Osim što je nerazorna i brza, omogućuje točnije procjene stanja kolnika. Iako postoje nedostaci kao što je visoka cijena opreme i potreba za specijaliziranim obrazovanjem osoblja, njezine prednosti ipak nadmašuju te izazove. Unatoč početnim troškovima, metoda povratnih analiza daleko je jeftinija od tradicionalnog uzorkovanja cesta i potencijalnih čestih popravaka, do kojih često dođe nepravovremeno. Ova metoda dugoročno smanjuje troškove jer omogućuje bolje planiranje održavanja i sprječava nepredviđene, skupe popravke.

Zbog svega navedenog, preporučuje se korištenje metode povratnih analiza za najprometnije i često korištene prometnice, gdje su pravilne i pravovremene intervencije od ključne za sigurnost i dugovječnost postojeće infrastrukture.

LITERATURA

- AL-Qadi, I.L., Lahouar, S. (2005). Measuring layer thickness with GPR – Theory to practice. *Construction and Building Materials*, 19, 763-772.
- Cuculić, M., Pranjić, I., Deluka-Tibljaš, A., & Stanić, I. (2020). Analiza asfaltnih kolničkih konstrukcija na temelju podataka strukturalne nosivosti. *Zbornik Radova (Građevinski Fakultet Sveučilišta U Rijeci)*, 23(1), 41-55. <https://doi.org/10.32762/zr.23.1.3>
- Dynatest. (2024). ELMOD. <https://dynatest.com/elmod/>
- Elaboratu ocjene stanja autoceste A2 Zagreb-Macelj, 2016.
- Horak, E. (2008). Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 50(2), 2-9. Retrieved February 09, 2025, from http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1021-20192008000200001&lng=en&tlng=en
- Keller, M. (2009). Gospodarenje cestovnim kolnicima. U L. Stjepan (Ur.), *Gospodarenje prometnom infrastrukturom* (str. 45-94). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice.
- Nguyen, T., Tan, J. Y., & Ho, N. Y. (2022). Deflection bowl parameters for falling weight deflectometer testing: data collection and threshold benchmarking. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2034815>
- Podzer, M.DŽ., Mazić, B.R. i Mihajlović, D. (2016). *Održavanje kolovoznih konstrukcija*. Građevinski fakultet u Sarajevu.
- Rukavina, T. (2014, 6.-7. veljače). Korištenje deflektografa s padajućim teretom i georadara za utvrđivanje postojeće i projektiranje potrebne nosivosti kolnika. [seminar Asfaltni kolnici]. Hrvatsko asfaltno društvo.
- Rukavina, T. (2017, 7. studenog). Nosivost kolničkih konstrukcija – mjerenje uređajem s padajućim teretom u svrhu utvrđivanja postojećeg stanja i projektiranja ojačanja. [radionica Projektiranje obnove asfaltnih kolnika]. Hrvatsko asfaltno društvo.
- Rukavina, T., Ožbolt M. (2009). Sustav gospodarenja kolnicima – prikupljanje podataka. U L. Stjepan (Ur.), *Gospodarenje prometnom infrastrukturom* (str. 95-176). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice.

Talvik, O., Aavik, A. (2009). Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment. *The Baltic journal of road and bridge engineering*, 4(4), 196-202.

PRILOZI

PRILOG, BR.1 - INDEKSI NOSIVOSTI											
DROP 3				DROP 2				DROP 1			
ROC	BLI	MLI	LLI	ROC	BLI	MLI	LLI	ROC	BLI	MLI	LLI
683	51.9	62.4	46.1	678	52.7	64.1	47	676	53.7	66.9	50.9
966	40.4	71.6	57.6	870	42.1	74.1	59.3	990	40.4	78.4	66.3
1136	32.2	40.7	27.5	1111	33	41.5	28	1143	33.4	46.4	32.6
877	37.9	50.4	36	847	39.5	53.5	36.1	995	36.9	55.2	39.6
800	39.8	47.7	34.2	784	41.4	49.3	35.4	810	40.7	51.6	38
404	78.8	78	50.9	398	79.3	80.4	51.9	388	82.4	85.5	56.5
2105	16.6	25.6	23.9	2062	16.6	26.9	24.6	1961	17.4	29.3	27.1
1117	33.8	59.7	51	1070	35.2	61.8	52.7	1124	33.3	64.3	54.7
1047	32.3	20	16.8	1005	33.7	19.7	18.1	971	32	24.2	16.4
1036	27.8	23.8	16.9	1020	27.9	24.4	16.9	962	29.4	25.5	18.6
1031	34.2	33.1	23.9	957	34.2	34.6	23.9	889	36.5	38.1	26
1709	20.4	27	24.1	1639	21	27.6	24.5	1695	21	29.6	26.8
1460	28.5	47.4	43.4	1439	29.3	48.7	44.5	1538	27.6	50.5	47.3
1042	32.8	37.1	30.8	957	35.3	39.4	32.5	1020	34.5	41.8	34.2
398	91.3	98.7	65.3	383	96.5	101.6	69.1	393	96.6	108.2	76.4
510	64.4	73.8	54.4	551	62.1	73.2	52.5	514	64	73.5	60.5
962	33.8	27.9	19	922	35.3	28.4	19.5	939	35.7	32.2	22.9
389	88.5	87.6	52.7	371	92	89.9	53.7	360	96.3	95	55.5
567	63.9	71	37.3	559	65.6	72.6	38.1	542	71.7	80.4	39.1
284	128.2	141.7	72.6	265	135.8	148.8	75.6	271	139.5	165.9	88
304	117.7	134.8	75.8	286	124	139.2	77.4	274	131.6	154.7	87.7
673	52.3	62.6	44.3	673	52.7	63.3	45	697	52.7	67.9	49.7
680	52.5	61.3	41.1	673	54	64.6	40.5	660	56.7	73.5	43.7
543	66.2	78.1	46.9	535	68.1	81.9	48.9	612	64.1	86.4	50.6
279	118.3	102.7	51.2	269	122.7	105.5	52.4	257	129	113.9	57.1
639	54.1	60.4	35.4	621	55.8	62.5	36.6	612	58	69.4	42.9
376	92.6	101.6	55.7	362	96.9	105	57.7	359	99.1	114.1	64.3
593	56.8	60.8	37	585	58	62.7	37.5	542	63	71.5	45
885	39.6	44.2	29.9	844	41.3	45.5	31.4	813	43.2	49.1	33.7
877	39.8	34.8	32.4	755	42.3	38	30.9	717	45.3	39	33.6
565	58.1	72.2	42.9	576	61.6	72.1	44.9	549	64.5	82	47.6
442	85.2	85.4	52.9	436	87.3	88.6	55.8	488	83.9	99.1	65.6
881	39.5	49.2	35.8	866	40.5	50.7	37.2	948	39.7	50.8	42
297	118.9	123.6	61.3	291	121.4	126.3	62	272	132.7	142.6	73.3
820	52.4	82.7	47	778	54.8	85	48.3	766	57.5	94.6	55.4
301	119.3	137.6	80.8	287	124.6	143.2	84	275	130.9	155.6	86
462	92.2	94.9	50.9	442	95.3	98	51.9	392	104.4	111.8	58.4
450	79.6	86.5	52.1	419	84.4	90.5	53.7	443	86.1	95.6	57.2
730	48.3	57.8	42.8	717	49	60.9	44.5	680	50.7	64	48.8
725	59.1	102.6	70.2	702	60.9	105.7	71.8	671	64.8	114.3	76.8
409	91.6	107.6	71.1	382	95.4	111.1	74	372	99.8	117.3	79.7
519	75.3	96.4	62.2	495	82	99.7	64.6	518	81.6	105.4	68.2
613	60.3	74.6	49.6	590	62.8	76.7	50.9	590	63.7	83.4	56.3
939	48.7	67.3	47	823	50.7	70.7	47	806	52.3	74.7	48.1
1361	29.6	42.2	31.6	1333	30.5	43.9	33.2	1325	33.4	47	38.5
464	72	67.3	39.8	438	75.8	71.5	42	446	74.9	78.3	44.5
425	85.1	99.5	60.2	401	88.1	104.5	63.4	401	87.4	109.6	65.2
372	92.6	109.5	74.7	360	94.9	113.1	77.4	350	99	126.8	87.5
306	125.3	155.6	91.9	297	129.6	159.9	93.5	301	135	173.5	100.2
995	36	49.5	39.3	990	37.5	52.1	41	885	38.2	51.9	43.4
602	68.7	81.8	52.8	597	69.6	85.9	53.8	604	75	95.3	59.7

823	45.8	52.3	34.8	766	48.2	54.8	36.4	873	47.7	58.9	40.3
562	70.9	97	58	559	71.5	101.7	59.1	602	68.8	104.9	64.6
599	64.2	83.1	48.5	593	65.2	84.7	49.5	585	67.9	92.5	56.4
423	81.1	84.4	52.5	413	83.6	86.1	53.6	412	86	93.3	60.1
588	56.5	69.3	45.6	585	57.4	71.3	47.3	567	59.3	77.3	52.5
645	58.6	66	45.4	587	62.2	70	47.7	680	63.7	71.7	52.2
495	88.1	122.3	70.9	474	90	127.3	69.5	423	101.5	149.5	85.5
766	51.1	59.4	42.5	690	52.5	62.6	42.7	714	54.4	65.5	45.1
568	60.2	59.7	41.5	549	61.5	64	43.5	551	62.6	69.5	50.2
656	61.2	78.6	52	669	60.8	85.9	53.2	917	50.1	86.4	56.8
714	46.6	55.5	41.1	692	47.9	55.9	42	664	50.9	63.4	48.7
562	66.8	76.7	49.1	518	70.2	77.3	49.5	570	63.2	79.5	52.1
617	56.5	64.6	39.9	604	58	66.3	41	538	65.2	77.3	50.1
766	45.5	52.7	36.8	760	46.1	54.1	37.8	813	47.2	54.6	40.8
1379	24.9	36.4	27.3	1307	25.1	40	30.5	1429	23.7	40.4	32.9
568	63.1	70.9	52.7	562	64.9	73.2	55.4	557	66.2	81.7	58.8
1418	24.2	35.2	31.2	1399	25.1	35.6	32	1342	26.8	38.9	34.9
1504	19.8	25.9	26.7	1429	19.3	27.3	25.5	1481	18	29.4	25.9
369	98.9	107.2	60.9	364	100.3	109.4	61.6	347	106.7	119.5	69.4
738	51.4	63.3	42.2	704	53.2	65.5	43.3	707	54.6	69.5	47.1
379	95.8	103.1	69.7	379	97.3	103.2	69.5	375	103.1	112.3	77.4
787	42.3	54.1	49.8	758	42.9	56.6	52.5	881	37.5	61.3	54.8
496	70.2	71.6	48.6	488	71.7	73.5	49.6	455	78	82.4	54.8
1099	31.5	37.9	30.8	1031	34	40	31.3	1099	34.6	40.2	31.5
397	92.5	111.8	77.8	398	93.3	114.2	78.8	377	100.2	127.2	89.1
813	45	49	42.5	830	43.8	52.3	44.1	866	43.2	55.8	47.2
722	50.9	61.7	51.2	676	51	63.4	51.1	707	49.1	67.3	54.6
913	37.2	50	41.2	926	37	50.7	42.3	948	37.5	54.6	44.8
1190	29.6	46.7	38.2	1156	31.8	47.1	39.8	1212	29.4	48.8	39.4
541	64.1	75.5	54.7	541	64.4	77.1	55.4	510	68.2	82.4	60.4
447	79.7	90.2	59.2	437	81.9	94.7	60.4	441	82.3	102.1	62.9
733	50.3	62.5	43.8	717	52.9	66.6	44.8	714	53.6	69.1	47.1
629	58.1	63.6	38.2	604	59.2	67.5	37	615	59.2	71.9	40.4
515	68.6	67.7	38.9	488	70.7	73.2	39.6	509	72.9	82.1	38.3
499	70.4	72.6	40.7	481	73.1	76	42.8	450	78.3	83.2	50.3
563	62.3	63	39.5	538	64.5	64.4	40.2	557	64.5	72.6	44.2
647	55.8	65.9	44.9	637	58.6	68.6	47	673	60.5	72.6	51.4
847	57.4	75.9	63.5	743	58.1	78.6	65.5	806	59.7	83.1	66.7
432	90.3	117.6	78.3	423	94.4	121.1	80.9	396	104.2	136.8	96.9
468	79.4	90.2	71.6	427	84.1	95.1	73.1	435	85.9	99.8	76.3
549	64.4	79	60.3	545	65.7	83.1	62.5	533	65.6	88.2	68.1
877	37.9	39	40	873	37.6	45.7	39.5	943	37.7	44.8	41
722	49.7	56.5	37.4	714	50.6	57.7	37.8	830	48	56.4	37.3
690	64.5	71.3	59.1	643	64.9	74.9	57.5	612	68.6	82.7	65.6
606	57.3	53	34.5	563	60.9	55.3	35.9	568	61.7	57.7	37.8
597	61.5	58.2	33.2	585	63.7	59.8	33.1	610	60.8	63.3	36.9
471	78.4	80.6	43.9	446	82.5	83.9	45.7	428	85.8	92.1	51.2
583	61.3	67.4	45.2	573	63.1	69.4	45.7	556	65.6	75.7	51.8
563	64.2	69.7	44	559	66.3	71	46.8	551	66.9	78.2	51.8
948	41.9	47.7	30.7	877	43.8	49	32.4	1105	44.7	50.7	35.8
324	106.1	106.9	67.8	304	112.4	112.3	70.7	300	116.8	121.3	76
556	61.7	64.2	38.2	536	63.9	66.1	40	590	60	68.8	43.5
625	48.2	46.5	32.2	573	55.8	54	36.9	870	43.8	56.8	45.6
554	65.4	75.8	48.3	532	68.2	79.5	50.7	539	68.9	84.8	57.8
450	78.1	93.2	60.3	447	79.3	95	61.1	440	82.4	105.4	69.9

581	58.5	61.1	40.2	581	59.1	62.9	41.5	599	58.9	66.8	46
576	61.6	70.8	47.9	570	62.1	72.4	49	549	65.1	78.2	54.7
722	49	54.8	35.2	725	49.3	55.9	36.3	712	51.5	61.6	39.8
917	46.5	47.1	33.2	800	45.4	50	33	881	44.7	50.6	34.5
1653	20.1	22.1	18.6	1575	20.9	22.7	19.4	1550	20.1	23.4	21
1923	16.6	18.3	15.4	1887	16.9	18.4	15.9	1942	17.1	20.4	17.9
1053	35.1	51.3	41.1	1020	35.7	55.8	38.9	1036	33.6	55	40.2
1026	36.4	48.2	37	1000	37.3	49.6	38	990	39.4	55.2	40.4
749	48	58.9	44.2	760	49.8	60.7	45.6	889	49.5	62.9	48.3
1869	19	21.6	16.1	1980	19.9	23.2	16.3	2597	20.9	25.3	18.1
1026	32.2	26.5	20.1	1242	33.7	26.3	23.7	1149	32.5	27.5	21.3
1587	20.8	15.2	14.3	1563	21.8	15.4	14	1439	21.9	18	15.2
1460	23.4	23.6	19.7	1408	24.1	24.9	19.6	1754	23.5	24.6	21.5
1176	34	30.2	23.3	1058	33.4	32.9	23.6	1036	35.1	35.4	25.1
1010	35.6	33.7	24	952	36.1	34.7	25.2	1000	35.8	35.9	26.2
1460	22.3	26.4	19.8	1449	23	26.7	21	1418	22.8	28.1	20.3
2151	15.6	16.8	13.2	2128	15.8	17.2	13.6	2105	15.3	18.4	14.3
1183	26.1	24.2	20.6	1176	26.6	24.5	21	1149	27.8	25.6	21.2
1695	20.6	21.6	16.6	1695	21.2	22.1	17.1	2247	20.7	22	16.1
1370	24.6	25.7	19.4	1307	25.4	26.3	20.4	1379	28.2	27.2	22.2
800	39.2	37.5	28.5	781	40.8	38.4	29.8	826	38.7	38.8	29.4
1399	21.2	14.3	14.2	1282	22.8	13.7	14.9	1342	21.1	15.3	15.7
1299	27.2	20.2	23.7	1379	28.1	18.2	24.6	1333	27.6	19.2	26.7
1942	20	8.9	15.7	1942	20.2	9.8	15.2	1818	21.1	8.7	15.7
1667	26.1	27	22.2	1724	27	29.2	23.1	2128	26.6	28.7	23.5
1802	21.9	28.8	23.8	1786	22.5	29.4	24.3	1802	23.1	30.8	27.1
2105	21	17.5	19	1961	22.7	17.3	19.8	2381	21.8	16.2	20.9
2381	16.6	11.7	15.4	2273	15.8	13.9	14.7	2151	16.1	15.3	14.6
2222	14.8	16.5	15	3333	13.8	20.1	17.2	3509	13.3	20.7	17.9
1399	23.7	22.5	15.2	1538	24	26	12.6	1802	21.2	26	12.6
833	41.5	47	35.2	820	42.4	48.5	36.2	775	45.7	53.1	40
1439	25.8	21	21.7	1389	26.1	21.1	23	1399	24.7	26	22
1156	26.5	21.5	15.7	1163	27.1	21.6	15.9	1026	29.1	22.5	16.7
1379	27.9	24.4	23.7	1307	28.3	26.9	23.6	1600	27.8	30.4	25
500	70.9	73.2	48.4	498	71.7	78.7	48.7	509	73.4	85.1	56.8
1681	22.4	18.8	16.3	1449	22.4	20.6	16	1626	22.2	20	18.7
651	55.6	66.1	40.4	649	56.5	68.5	42	660	58.2	76	50
840	47.1	74.4	46.8	897	50.2	76.8	45.3	862	51.8	84.5	57.7
678	56.6	71.4	42.9	631	58.4	74.7	44.1	654	60.8	80.8	50.4
536	62.5	53.1	32	501	65.3	54.2	33.3	512	66.8	63.2	37.6
608	57.5	66.5	43.4	602	58.6	69.7	45.4	627	58.6	72.5	51.9
452	81.1	94.9	53.5	444	82.3	98.8	55.1	430	87.8	110.4	65.5
712	53.2	61.2	44.9	656	53	64.8	44.8	685	52.5	68.1	49.9
477	79.5	77.9	43.8	489	79.3	79.4	44.4	468	84.2	87.5	54.6
510	67.6	69.9	42.1	480	69.1	73.1	44.3	490	68.5	77.9	47.1
1010	35.8	36.7	26.9	917	36.9	38.5	26.7	922	39	41.3	32.4
685	49.7	54.8	41.5	662	51.2	56.4	42.6	690	49.8	65.2	42.9
922	36.9	39.8	28.7	926	37.3	42.1	29.5	847	39.3	43.7	34.2
1117	31.6	37.3	29.8	1130	31.6	39.1	30	1198	31.8	42.1	32.4
820	45.6	56.8	38.4	781	47.6	59	39.2	823	47.5	63.1	45.2
549	62.4	69.7	46.3	531	64.3	71.6	47.6	621	60.5	74.7	51.5
957	38.5	46.5	33.4	957	38.1	47.8	34.9	962	37.4	50.4	37.2
1026	34.5	41.9	29	1005	35.4	42.6	29.9	976	37	46.7	33.6
806	44.6	58.3	39	800	45	59.8	39.6	881	42.7	61.2	42.7
813	44.4	42.7	33.1	810	45	44.5	33.8	749	46.7	49.2	39.3

1117	31.3	38.5	30.7	1111	31.5	39	30.9	1111	31.9	42.3	33.8
881	43.5	56.9	39.4	844	45.5	59.8	41.7	976	42.9	60.8	45.6
851	42.9	54.3	38.2	820	44.5	57.1	39.6	909	41.8	58.1	43.3
1149	34.3	42.4	29	1198	34.8	43.5	30.2	1399	31.7	44.5	32.2
2410	13	11.4	10.1	2410	13	11.6	9.9	3509	12.9	13.6	7.9
2041	15.7	11.1	10.6	2041	16.3	11.3	10.6	2020	15.4	12.5	11.2
2597	17.2	12	12.6	2532	15.5	13.5	13	2817	17	12.5	13.1
2439	16.7	15.3	10.4	2410	16.9	15.9	10.2	3125	15.5	15.7	10.8
2000	12.8	11.4	9	1980	12.5	11.9	8.7	2041	14.3	11	9.5
2564	13.6	12.5	10.8	2326	13.9	13	11.3	6250	14.7	9.8	10.1
2439	12.7	11.2	9.4	2381	13	11.3	9.9	2326	12.8	12.4	10.2
1379	21.4	13.9	11.2	1325	22.3	14.4	11.8	1575	19.3	14.2	11.3
1835	21.4	31.8	23.8	1770	21.6	32.5	24	1754	22.7	34.4	26.5
1299	26	26.3	17.7	1290	26.3	26.9	18	1282	26.8	28.6	18.8
1242	26.6	27.1	21.2	1205	27.2	27.8	21.5	1156	28.9	31	24.2
851	44.8	51.6	31.3	830	46.2	54.1	32.1	820	45.9	56.3	33.9
643	55	57.5	32.9	629	56.4	58.8	33.7	592	60.1	62.9	35.8
1695	21.6	28.3	21.7	1639	22.7	29.6	21.7	1613	22.4	30	23.8
926	38.4	45.5	29.2	905	39.3	46.2	29.6	922	39.6	48.1	31.5
877	40	47.7	33.5	855	40.3	48.4	33.4	851	41.4	52.2	37.8
971	37.2	40.7	26	957	37.9	41.9	26.4	957	38.7	45.3	28.8
2198	18.7	29.6	19.5	2174	18.9	30.1	20.1	2020	20.2	33.3	23.1
1504	23.9	28	16.6	1493	24.2	28.6	16.8	1418	25.9	31.4	19.7

PRILOG BR.2 - TABLICA DEFLEKSIJA ZA SVA 3 UDARCA IZMJERENA NAKON POKUSA FWD UREĐAJEM

Deflections, Drop 1															Deflections, Drop 2															Deflections, Drop 3																	
Chaigne	Stress	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Chaigne	Stress	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	Chaigne	Stress	Load	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
24050	692	48.91	273.4	231.7	213.9	243.8	236.4	219.7	213.2	187.5	152.8	101.9	65.4	42.6	29.1	24050	718	50.75	260.9	222.1	203.8	231.4	226.4	208.2	205.3	177	144.1	97.1	64.1	43.8	32.3	24050	705	49.83	255.3	217.1	199	226	221.4	203.4	200.9	173.1	141	94.9	62.9	43.4	31.9
24150	682	48.21	296.8	276.8	223.9	246.8	252.2	256.4	226.1	220.7	178	111.7	65.7	43.5	32.9	24150	723	51.11	278.1	257.5	209.2	255.1	236.7	236	212.6	201.3	161.9	102.6	65.5	45.6	35.1	24150	707	49.97	269.9	250.9	203.7	249.2	230.6	229.5	207.2	196.3	157.9	100.3	64	44.6	34.2
24250	713	50.4	187.6	169	147.4	170.1	156.7	154.2	141.5	130.5	107.8	75.2	53.4	39.4	31.3	24250	719	50.82	175.1	154.1	133.6	153.5	143.6	138.5	130	117.3	97	69	49.6	37.9	30.2	24250	712	50.33	168.4	151.7	131.6	150.8	141	136.2	127.8	115.4	95.5	68	49.4	38	30.9
24350	670	47.36	217.9	176.6	180.3	197.8	187.9	181	171.3	154.3	125.8	86.2	58.6	42.5	31.1	24350	738	52.17	212.7	171.5	174.1	189.1	184.2	173.2	169.5	147.9	119.7	83.6	58.8	44.2	32.6	24350	711	50.26	204.8	165	167.8	182	177.5	169.9	162.7	142.4	116.5	80.5	56.4	41.7	32.4
24450	703	49.69	225.4	202	175.6	200.7	205.2	184.7	186.1	159.3	133.1	95.1	65.7	47.7	35.6	24450	730	51.6	216	192.8	167.2	190.5	194.4	174.6	179.2	150.2	125.3	89.9	63.1	46.8	36.1	24450	704	49.76	207.7	185.3	160.8	182.7	186.8	167.9	172.5	144.3	120.2	86	60.2	44.8	34.7
24550	681	48.14	215.9	260.7	245.3	264.3	255.8	233.5	219.2	189.4	148	91.5	56.5	41	31.7	24550	710	50.19	298.5	245.1	230.2	248.3	242.3	219.2	209.2	177.6	138.8	86.9	55.8	42.1	33.9	24550	709	50.12	294.4	242	226.7	244.9	238.4	215.6	206.7	176	137.6	86.7	56.1	42.2	32.9
24650	714	50.47	152.2	140	124.5	142	130.2	134.8	121.3	121.8	105.5	78.4	56.1	43.7	34.9	24650	713	50.4	141.7	130.7	116	132	121.9	125.1	113.7	113.1	98.2	73.6	54.3	42.8	34.6	24650	710	50.19	139.2	128.5	114	129.7	120.2	122.6	111.9	111.5	97	73.1	52.9	42.7	34.1
24750	664	46.94	251.6	222	204.3	233.8	212.2	218.3	193	187.4	154	99.3	62.6	43.5	35.2	24750	733	51.81	246.4	217	200.3	227.7	209.6	212.1	191.4	181.9	149.4	96.7	62.9	46	36.9	24750	707	49.97	237.8	210	193.4	219.9	203	204	185.5	175.6	144.3	93.3	61.3	45.7	36.4
24850	676	47.78	123.7	104.4	89.8	103.1	100.1	91	88.5	78.8	67.5	51.1	39.6	33	26.1	24850	721	50.96	119.8	100.7	84.3	99.9	96.7	86.1	85.2	75.3	66.4	48.3	37.2	33.3	24.6	24850	708	50.05	117	98.3	83.5	97.9	94.8	84.7	83.6	73.8	64.7	47.9	37.6	32.3	25.6
24950	682	48.21	132.4	105.7	101.9	111.6	108.3	103	100.1	90	77.5	58.9	43.9	34.7	29	24950	711	50.26	125.9	101.4	96.7	106.3	104.2	98	96.9	85.4	73.6	56.7	44.1	35.2	29.4	24950	709	50.12	124.6	100.6	96.1	105.3	103.4	96.8	96.1	84.6	73	56.1	43.9	35	29.6
25050	720	50.89	175.8	154.5	132.4	151.3	146.5	137.3	133.5	117.8	99.2	73.2	53.1	39.7	30.2	25050	718	50.75	161.9	144.6	123.1	141	136.8	127.7	124.9	109.9	93.1	69.2	51.1	39	30.6	25050	711	50.26	157.1	139.9	119	137.7	132.2	122.9	120.2	106.6	89.8	65.9	48	36.1	27.9
25150	704	49.76	176.3	134.3	118	144.3	127.2	135.1	116.9	121.4	105.5	78.7	57.9	44.6	35.7	25150	713	50.4	147.4	127.1	111.2	135.2	120.6	126.4	111	112.8	98.8	74.3	56.2	44.6	37.1	25150	705	49.83	144.8	125.1	109.1	133.1	118.8	124.4	109.2	111.3	97.4	73.3	55.3	44	36.6
25250	710	50.19	238.9	197.1	191.6	225.9	195.8	211.3	172.9	188.2	160.8	113.5	71.3	49.8	37.6	25250	726	51.32	228.9	188.7	184	215	188.5	199.6	166.3	177.3	150.9	106.4	70.1	49.3	39.4	25250	700	49.48	222.3	183.3	178.7	208.6	182.8	193.8	161.6	172.2	146.4	103	67.6	47.6	37.9
25350	684	48.35	227.8	189.5	170.5	208.2	195.1	193.3	175.2	173.1	151.5	117.3	86.3	55.6	35.8	25350	752	53.16	218.8	182.3	163.8	197.9	185.5	183.5	170	164.2	144.1	110.6	84.4	54.8	39	25350	707	49.97	206.6	172.7	155.1	187.4	175.6	173.8	160.9	155.2	136.7	105.9	80	51.5	37.1
25450	669	47.29	406.5	324.6	297.8	355.6	335.5	309.9	290.2	257	201.7	125.3	80.1	52.7	42.1	25450	731	51.67	388.5	310.1	283.4	336.3	325.7	292	282	242.2	190.4	121.3	80.8	57.2	47.8	25450	719	50.82	371	296.8	273.8	320.7	313.3	279.7	271.4	230.2	181	115.7	76.5	56.2	46.4
25550	515	36.4	295.2	230.6	213.3	256.3	233	231.2	204.6	195.7	157.7	97.2	66.8	44.8	35.1	25550	611	43.19	279.6	221.5	205.4	243.3	227.3	217.5	200.1	181.1	144.3	91.8	63.7	48.4	39.5	25550	702	49.62	290.7	232.5	218.2	251.5	242.1	226.3	213.8	190	152.5	98.1	68.5	52.7	42.9
25650	723	51.11	170.1	153.7	130.1	148.8	145.8	134.4	133.9	117.2	102.2	79.3	62	45.8	39.7	25650	727	51.39	157.8	142.2	120.6	136.1	135.7	122.5	125.1	107.7	94.1	74.6	60.1	46.3	40.6	25650	709	50.12	151.5	136.2	116.2	130.7	130.3	117.7	120.3	102.5	89.8	70.8	56.5	42.9	37.8
25751	689	48.7	374.7	282.5	271.7	319.1	315.6	278.4	276.8	227.1	183.4	127.9	91.3	69	53.8	25751	721	50.96	363.2	276	265.1	309.3	308.3	271.2	272	223.2	181.3	127.6	92.3	70.5	55.5	25751	705	49.83	354.2	270.1	260.3	302.8	262	265.7	266.5	218.9	178.1	125.4	90.8	69.5	54.4
25850	694	49.06	285.2	205.8	207.8	248.3	237	213.5	206	172	133.1	94	68.4	53.4	41	25850	721	50.96	269	198.4	199.7	233.2	226.1	203.4	198.3	164.5	130.8	92.7	69.4	54.3	43.2	25850	705	49.83	263	193.9	195.4	227.7	220.8	199.1	193.8	160.8	128.1	90.8	66.6	52.3	42.1
25950	675	47.71	475.4	352.9	307.8	401.6	381.8	359.5	308.9	246.3	170	82	44.5	36.6	32.2	25950	740	52.31	437.8	320.5	285.1	362.4	353.4	302	286.7	220.3	153.2	77.6	48.1	40	35.1	25950	707	49.97	417.6	307.1	273	347.1	237.6	289.4	274.4	211.7	147.7	75.1	46.3	39.2	34.5
26050	695	49.13	453.7	346.1	296.2	380.8	362	322.1	296.8	238.3	167.4	79.7	38	26.3	24.8	26050	721	50.96	416.7	315	273.2	346.7	334.2	292.7	275.9	217.4	153.5	76.1	40.2	29.1	26.7	26050	700	49.48	403.2	306.3	265.6	337.5	323.7	285.5	267.8	212.8	150.7	74.9	39.9	28.7	26.2
26150	682	48.21	245.1	208.4	179.5	216.4	207.4	192.4	181.4	158.7	124.5	74.8	40.8	23.4	16.3	26150	713	50.4	231.4	196.4	168.6	201.7	196.7	178.7	171.8	146.9	115.4	70.4	40.4	24.9	18.1	26150	715	50.54	229.6	195.1	167.5	199.9	195.3	177.3	170.7	170.6	141.7	70.4	40.5	24.9	17.8
26250	720	50.89	242.9	202.9	173.2	212.6	203.2	186.2	178.2	151.9	112.7	69	40.4	27.7	17.6	26250	718	50.75	222.5	185.3	159.8	192.8	186.8	168.5	164.5	137	103.9	63.4	39.1	27.9	19.6	26250	710	50.19	218.8	182.7	159.5	189.4	183.4	166.3	162.2	134.5	105	63.9	39.5	27.3	20.7
26350	617	43.61	274.6	213.7	196.8	241.9	223.4	210.5	190	171.3	124.1	73.5	44.5	34.4	26.6	26350	725	51.25	274.9	215.8	195.6	237.5	224.6	206.8	192.3	165.5	124.9	76	49.4	38.3	31.9	26350	712	50.33	264.1	207.6	188.8	227.3	217.1	197.9	185.3	158.4	119.8	72.9	48	38.1	31.1
26451	703	47.57	371.6	310.5	230.9	293.8	287	242.6	232.7	177.6	128.7	71.6	45.8	35.3	29.2	26451	729	51.53	353.7	295.5	221.5	279.3	277.2	231	226.5	170.5	125.5	73.1	49.5	39.4	32.8	26451	721	50.96	343.6	288.3	216.3	271.9	271	225.3	221.6	166.4	122.6	71.4	47.7	38.3	31.5
26550	708	50.05	232.7	194.5	162.3	200	189.5	174.7	163.9	137.8	105.3	62.4	37.1	23.6	17.6	26550	720	50.89	210.7	176.7	146.4	178.5	171.8	154.9	148.9	121.3	92.4	55.8	34.4	23.3	18	26550	711	50.26	204.1	171.3	142.2	172.8	167.1	150	144.9	117.5	89.6	54.2	33.4	22.9	17.9
26650	674	47.64	342.9	259.8	231.2	287.2	279.5	243.8	236.9	183.8	129.7	65.4	34.2																																		

35050	681	48.14	217.2	181.8	170.1	194.5	189.8	172.5	169.9	146.4	121.9	87.4	64.7	51.2	39.7	35050	728	51.46	217.4	183.1	171.2	192.4	192.1	172	172.7	145.5	122	89	66.7	52.4	43.5	35050	707	49.97	211	176.5	161.5	189.2	184.1	164.5	165.6	140.6	117.4	84.2	65.3	52.4	39.9
35150	665	47.01	145.8	125	120.5	132.9	128	125.7	119	115.2	102.3	81.3	66.6	52.9	41.9	35150	726	51.32	147.4	127.7	123.7	134.7	130.1	126.5	122.2	115.6	103.8	84.4	68.1	54.4	44.7	35150	714	50.47	142.9	123.9	120.7	130.8	126.7	122.8	118.9	112.3	100.7	82.1	66.2	53.7	44.3
35250	730	51.6	135.7	124.5	114.4	125.4	121.6	118.6	114.1	109.1	98.2	80.3	63.4	50.3	39.9	35250	717	50.68	125.3	114.2	105.3	114.7	112.3	108.4	105.4	99.9	90	74.1	59	47.8	38.9	35250	714	50.47	122.2	111.2	102.6	111.8	109.6	105.6	103	97.2	87.3	71.9	57.1	47	38.3
35350	652	46.09	238.4	217.9	185.6	219.1	210	204.8	192.7	180	149.8	109.6	76.4	56.4	43	35350	721	50.96	244.4	222.4	189.6	224.8	216.4	208.7	198.6	183.9	152.9	114	80.2	61.5	47.3	35350	710	50.19	237	217.3	186.9	218	210.1	201.9	192.4	177.3	150.6	109.5	77.1	57.6	45.7
35450	728	51.46	230.8	206.7	177.1	210.6	204.3	191.4	185	166.2	136.2	95.8	68.4	51.5	39.6	35450	725	51.25	216.2	194.7	167.7	196.2	192.1	178.9	174.1	154.3	129.3	91.3	65.3	49.9	40.7	35450	713	50.4	210.2	189.6	163.1	190.7	186.8	173.8	169.7	149.9	125.6	88.6	63.6	48.6	39.6
35551	691	48.84	278	232.9	221.3	255.5	245	228.5	221.9	199.7	165.6	117.3	83.8	62.6	48	35551	720	50.89	270.3	227.9	214.6	244	238	220.5	216.1	191.8	159.8	114.2	81.9	61.7	48.5	35551	714	50.47	263.4	224.3	210.3	236.7	232.3	215.4	211	186.5	156.5	112.3	80	59.9	47.8
35650	694	49.06	138.7	119.4	110.9	131	122.4	117.8	113.3	108.2	92.5	74.4	58.8	46.6	33.9	35650	739	52.24	133.4	117	110.2	123.3	118.1	113.5	110.7	103.5	90.3	74	58.1	44.8	36.2	35650	700	49.48	126.3	110.7	104.9	115.6	111.6	107.3	104.6	97.4	85.7	69.6	54.3	42	34.5
35750	637	45.03	153.2	120.1	116.4	135.8	131.2	120.7	120.2	108.5	93.2	71.9	59.7	46.7	36.2	35750	714	50.47	158.1	125.2	117.3	142	135.4	124.4	125.3	112.5	98.1	74.4	63.7	51.5	38.5	35750	715	50.54	154.4	124.1	120.5	134.9	131.8	122.2	121.9	109.4	95.7	75.6	61	49.6	39.8
35850	720	50.89	120	99	97.2	106.1	101.6	98.1	95.1	88.8	80.1	64.9	54	44.3	35.4	35850	716	50.61	112.8	92	91.2	100	96.3	91	89.2	83.3	75.6	61.6	51.6	42.6	34.5	35850	706	49.9	110.9	91.1	89.9	98.3	93.9	90.1	88.1	81.9	74.9	60.6	51.2	42.3	34.2
35950	642	45.38	139.1	116.5	107.7	127.7	118.3	115.6	109.1	107.2	91	69.5	57.2	45.2	34.4	35950	719	50.82	143.6	120.5	114	129.4	123.2	119.5	113.7	107.5	94.6	75	59.8	47.2	38.1	35950	722	51.04	139.8	117.4	111.3	126.1	120.5	116.4	111	104.6	92.8	73.1	58.8	46	37.2
36050	705	49.83	173.7	141.5	133.9	154.4	148.1	138.6	133.7	121.6	103.2	78.1	59.6	45.5	36.2	36050	717	50.68	165.2	134.9	129	146.3	141.5	131.8	128.5	115.3	98.9	75.3	57.3	44.7	36	36050	720	50.89	162	132.7	126.3	145	139.2	128	126.7	113.5	97.8	74.5	57.3	44.1	35.3
36150	673	47.57	178.5	143.8	137.8	158.5	150.1	142.7	134.9	124.2	106.8	80.6	60.8	47.5	38.7	36150	718	50.75	176.3	141.9	136.5	155.3	149.2	140.2	134.3	122.5	105.5	80.3	61	48	39.4	36150	709	50.12	172.7	138.8	134.1	152.9	146.2	137.1	131.4	119.6	103.4	79.4	60.8	47.5	38.6
36250	682	48.21	149.6	123.1	125.4	135.5	131.8	126.8	122.3	114.9	98.7	78.4	62.1	49.4	38.3	36250	729	51.53	152.3	128.1	129.9	138.5	134.2	129.3	125.2	116.4	102.6	81.6	63.6	50.1	40.6	36250	712	50.33	147.4	123.2	124.5	133.7	130.2	125.1	121.1	113	98.7	78.9	62.3	49.6	39.6
36350	690	48.77	104.9	87.4	88.7	95.4	89.9	89.6	82.9	81.3	71.2	56.9	46.2	36.8	29.9	36350	722	51.04	102.5	84.8	86.7	93.1	87.7	86.7	80.8	78.5	69.5	55.9	45.4	36.8	30.4	36350	715	50.54	100.4	83	84.9	91.1	86	84.8	79.1	76.6	68	54.8	44.6	36.3	30
36450	699	49.41	150.7	123	122.7	133.3	130.5	122.9	120.6	111.4	97.3	76.1	58.7	45.4	35.5	36450	717	50.68	146.7	122.9	119.4	129.7	127.6	120.1	118.8	107.8	95.6	74.6	57.1	45.4	36.3	36450	715	50.54	143.8	121	117.4	126.9	125.4	117.7	116.4	105.4	93.5	72.9	56.1	44.4	35.5
36550	652	46.09	124.3	103.9	96.2	115.4	107.2	103.6	99.2	94.3	81.6	65.5	50.7	40.7	32.2	36550	719	50.82	129.7	108.8	103.6	117.9	112	108.5	104	97.9	86.4	69.3	54	43.5	35.5	36550	726	51.32	126.3	106.5	101.7	114.5	109.5	105.7	101.8	95.3	84.1	67.5	52.3	42.4	34.6
36650	720	50.89	156.9	128.4	124.7	142.4	135.5	128.7	124.2	116.8	101.5	79.3	62.5	48.8	37.1	36650	723	51.11	148.1	122.1	121.7	132.8	128.4	122.7	119.3	109.8	96.4	76	59	46.1	36.9	36650	713	50.4	144.5	119.1	118.1	129.9	125.4	119.9	116.4	107.3	94.2	74.8	59	45	36.7
36750	650	45.95	191	149.1	151.7	166.8	167.6	152.3	149.5	132.5	113.5	84.1	62	47.4	36.9	36750	723	51.11	196.8	154.2	156.4	171.2	173.6	156	155.4	136.3	117.6	87.8	66	50.9	40.5	36750	706	49.9	190.7	149.5	151.7	165.7	168.6	151.5	150.9	132.3	114	85.5	64.2	49.8	39.7
36851	697	49.27	115	91.8	94.2	100.1	97	93.9	90.5	87.7	78.6	62.9	50.2	39.3	31.8	36851	721	50.96	114	91.4	92.3	98.4	96.6	91.2	90	86.6	77.5	62.6	51.5	39.6	32.3	36851	719	50.82	111.8	90.5	91.9	97.5	94.7	90.6	88.9	84.8	76.3	62.1	50.2	39.2	31.9
36950	728	51.46	159	132.4	130.5	144	140.8	131.4	128.2	115.2	112.2	85.5	66.4	51.6	40.2	36950	711	50.26	150.2	124.4	121.7	135.7	131.4	122.1	121	109.5	103.9	79.3	62	47.3	36.9	36950	715	50.54	149.1	123.2	121.1	133.7	130.6	121.9	120.4	108.9	101.7	78	59.4	45.9	35.7
37050	682	48.21	106.5	88.6	89.4	95.5	92.8	85.4	73	86.6	76.7	61	50.4	36.8	26.9	37050	713	50.4	105.5	88.9	88.6	95.2	90.6	85.3	84	84.8	75.5	60.3	49	37.5	28.3	37050	710	50.19	104.6	89.7	87.6	94.3	91.6	84.6	86.4	84	75.7	60	48.1	36.8	29.8
37150	650	45.95	171.8	144.7	138.9	162.4	180.9	145.2	195.9	130.6	116.5	93	74.6	59.3	45.2	37150	746	52.73	173.7	149	143.6	162.1	183.5	146.7	207	131.9	117.5	94.4	74.7	59.3	47.1	37150	709	50.12	163.3	139.4	133.1	151.3	176.6	137.2	192.7	123.6	110.2	88	68.4	55.6	44.1
37250	708	50.05	171.9	154.5	140.5	160.8	155.1	148.8	143.3	132.7	118	90.9	68.4	51	40.9	37250	717	50.68	162.8	145.8	134	151.6	147.5	140.3	136.6	125.5	109.9	86.6	65.9	50.1	40.6	37250	708	50.05	159.1	142.6	131.2	148	144.1	137.2	133.6	122.7	108.4	84.6	64.8	49.2	40
37351	611	43.19	135.6	110.2	106.9	127.2	119.4	113.8	109.8	112.5	97.6	76.7	62.4	44.1	36	37351	726	51.32	140.8	118.7	115.2	130.6	124.8	118.1	116.3	111.8	100.8	81	65.8	47.1	39.6	37351	711	50.26	136	115.5	112	126.5	120.7	115	112.9	107.2	97.5	78.5	63.4	46.9	39.3
37450	701	49.55	100.6	92	89.6	100.3	95.5	93.5	90.6	86.5	78.2	63.6	51.7	41.5	34	37450	721	50.96	106.7	90.2	87.6	97.9	94	90.9	89.1	84.6	77	62.3	52	40.9	34.5	37450	711	50.26	104.3	88.3	85.7	95.9	91.8	87.7	83.2	84	76	60.6	51.3	39.8	33.9
37550	699	49.41	126.1	104.1	107.2	120.4	112.2	112.8	107.4	104.3	92.1	74.2	64.9	50.6	35	37550	737	52.1	124.1	102.8	104.1	118.1	110	110.3	106.1	102.3	90.2	73	64.6	50.5	34.8	37550	716	50.61	119.1	102.3	104	110.1	107.3	104.3	101.3	96.6	87.8	72.8	58.4	46.5	35.9
37650	604	42.69	125.3	100.6	99.5	114.2	110.6	104.1	99.5	95.1	78.1	65.5	50.3	42.7	32.6	37650	723	51.11	135.5	109.2	106.8	122.5	118.5	111.5	108.3	101.6	85.5	72.9	55.2	46.9	38.8	37650	711	50.26	129.7	105.5	102.9	115.4	111.3	106	104.1	95.1	83.5	68.3	53.7	43.8	37.2
37750	730	51.6	256	210.5	188	230.2	224.7	210.3	204.1	183.2	157.2	117.2	86.9	64.7	49.7	3																															