

LOGISTIKA PRIKUPLJANJA I ODVOZA OTPADA

- Teorijski uvod -

izv. prof. dr. sc. Ratko Stanković
Fakultet prometnih znanosti

1. PRIKUPLJANJE OTPADA – PROBLEM OPTIMIRANJA

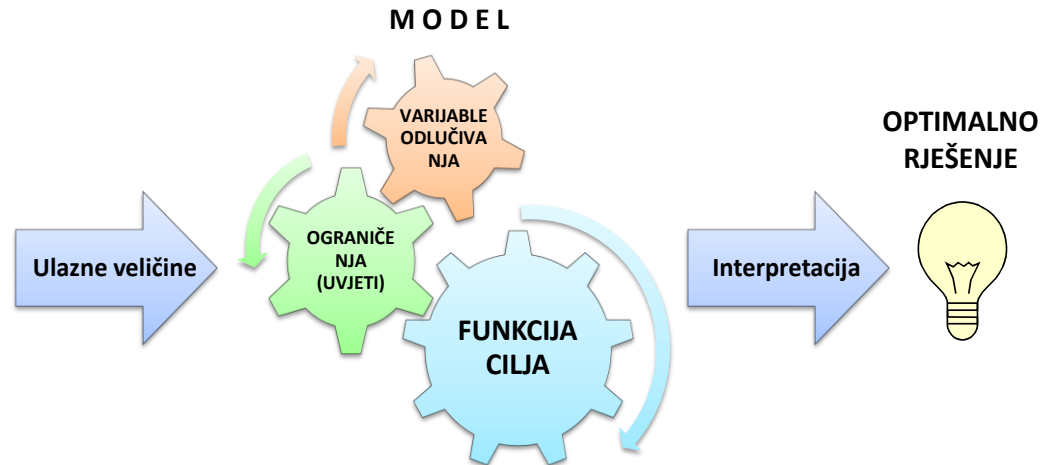
Kompromis, eng. *trade-off* između *efikasnosti* i *efektivnosti*

- **Efektivnost:** - preuzeta količina;
- frekvencija obilaska.
- **Efikasnost:** - troškovi voznog parka;
- troškovi osoblja.



1.1 Optimizacijski model

(Linearno programiranje)



▪ Funkcija cilja

- Preuzeti sav otpad koji su odložili korisnici sa što manjim angažiranjem resursa:
 - broj operativnih ekipa (radnici + vozilo),
 - prijeđeni kilometri.

▪ Ograničenja/uvjeti

- Količina odloženog otpada akumulira se kontinuirano, a maksimalna količina ograničena je *kapacitetom spremnika* za otpad.
- Preuzimanje otpada obavlja se periodički, a preuzeta količina ograničena je *kapacitetom vozila*.

- **Ulazni podaci / Parametri modela**

- Broj operativnih ekipa.
- Kapacitet vozila.
- Radno vrijeme operativnih ekipa i odlagališta.
- Rute obilaska (duljina/trajanje rute, broj korisnika, ukupna količina odloženog otpada).

- **Varijable odlučivanja**

- Frekvencija i raspored obilaska rute.

- **Tehnika rješavanja**

- Numeričke metode
- Algoritmi.

1.2 Normiranje radnih aktivnosti i izvedbeni pokazatelji

- **Ispravno normiranje** – pretpostavka za objektivnu ocjenu radne učinkovitosti i iskorištenja resursa:
 - Ulazni podaci.
 - Izbor izvedbenih pokazatelja.
- **Izbor izvedbenih pokazatelja**
 - Ostvareni radni učinak (t, km, tkm)
 - Trajanje pojedinih aktivnosti
 - Koeficijent ispravnosti α_i

$$\alpha_i = \frac{D_r + D_p}{D_r + D_p + D_n} = \frac{D_s}{D_k}$$

gdje je:

D_r = broj radnih (aktivnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_p = broj pasivnih (neaktivnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_n = broj nesposobnih (neispravnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_s = broj sposobnih (ispravnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_k = broj knjigovodstvenih dana vozila u promatranom periodu.

- Koeficijent angažiranosti α_a

$$\alpha_a = \frac{D_r}{D_r + D_p + D_n} = \frac{D_r}{D_k}$$

gdje je:

D_r = broj radnih (aktivnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_p = broj pasivnih (neaktivnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_n = broj nesposobnih (neispravnih) dana vozila u promatranom periodu;

D_k = broj knjigovodstvenih dana vozila u promatranom periodu.

- Koeficijent angažiranosti tijekom radnog vremena α_{ad}

$$\alpha_{ad} = \frac{H_r}{H_{uk}}$$

gdje je:

H_r = broj aktivnih radnih sati (sati u radu) u promatranom periodu;

H_{uk} = ukupni broj radnih sati u promatranom periodu.

- Koeficijent iskorištenja prijeđenog puta α_0

$$\alpha_0 = \frac{S_{uk}}{S_0}$$

gdje je:

S_{uk} = ukupni prijeđeni put (km) u promatranom periodu;

S_0 = nulti prijeđeni put (km)

- Koeficijent statičkog iskorištenja kapaciteta α_{ks}

$$\alpha_{ks} = \frac{Q_{uk}}{K \cdot n_v}$$

gdje je:

Q_{uk} = ukupna količina prevezenog tereta u promatranom periodu (t/m^3);

K = kapacitet (nosivost) vozila

n_v = broj vožnji u promatranom periodu;

- Koeficijent dinamičkog iskorištenja kapaciteta α_{kd}

$$\alpha_{kd} = \frac{R_{uk}}{K \cdot S_k}$$

gdje je:

R_{uk} = ostvareni radni učinak u promatranom periodu (tkm);

K = kapacitet (nosivost) vozila (t/m^3)

S_k = prijeđeni put s teretom u promatranom periodu (km);

○ Prometna brzina V_p

$$V_p = \frac{S_{uk}}{t_v}$$

gdje je:

S_{uk} = ukupni prijeđeni put;

t_v = vrijeme u vožnji (trajanje prijevoza bez stajanja);

○ Eksploatacijska brzina V_e

$$V_p = \frac{S_{uk}}{t_{uk}}$$

gdje je:

S_{uk} = ukupni prijeđeni put;

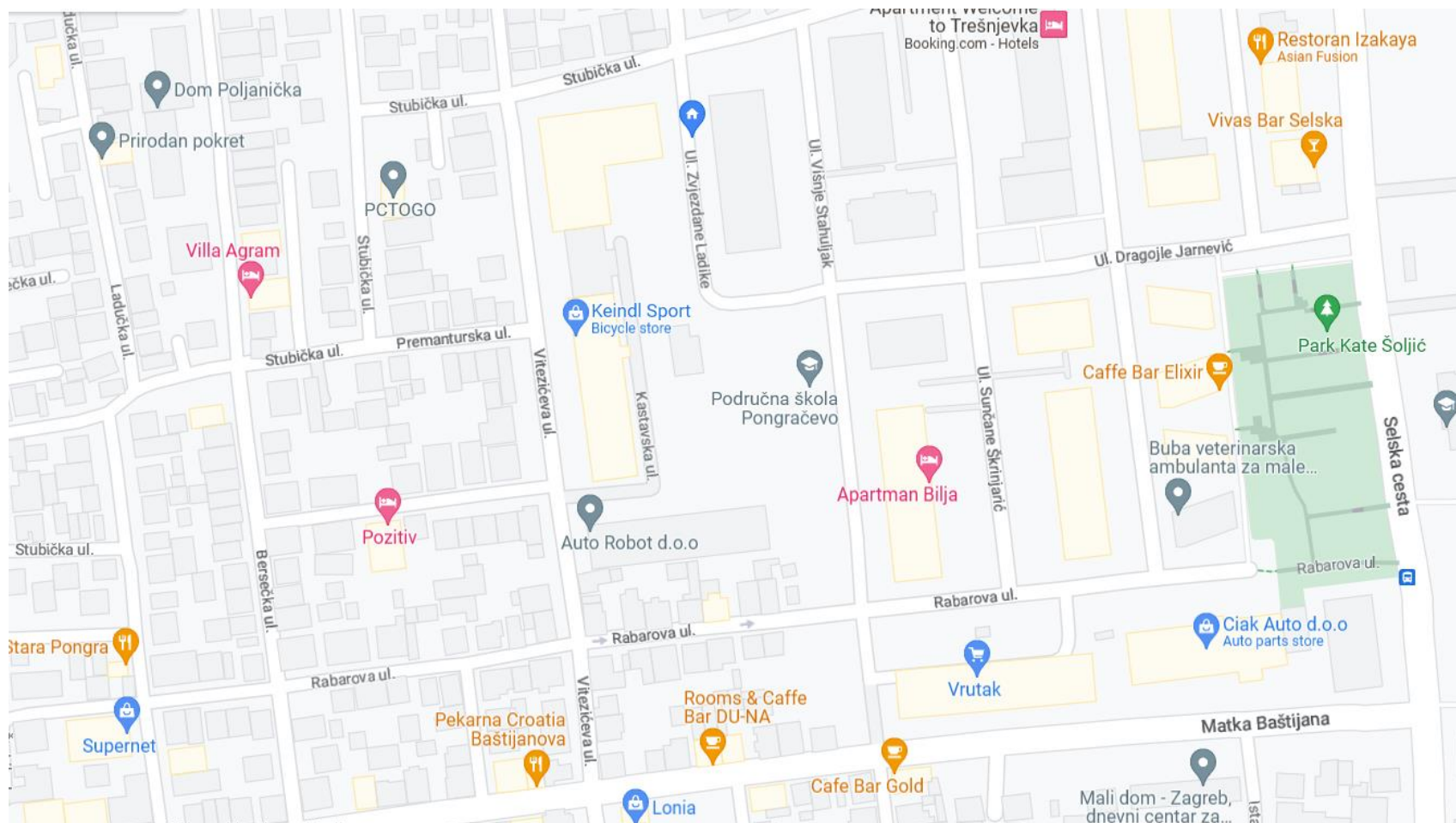
t_{uk} = ukupno vrijeme (trajanje prijevoza sa stajanjima);

2. PARAMETRI PRIKUPLJANJA OTPADA

- **Područje prikupljanja**
- **Značajke rajona**
 - Obilježja područja
 - Struktura korisnika
 - Količine i vrste otpada koji treba preuzeti (postojeće stanje, prognoza)
 - Rute obilaska
 - Potreban rad za prikupljanje otpada (radni sati, t, km, tkm)
- **Ljudski i materijalno tehnički resursi**
 - Operativna ekipa: vozilo + radnici
 - Raspored ekipa:
 - rajoni, rute
 - dani.
- **Podjela na rajone**
 - Dinamika promjene značajki
 - Cilj: ujednačeno radno opterećenje ekipa

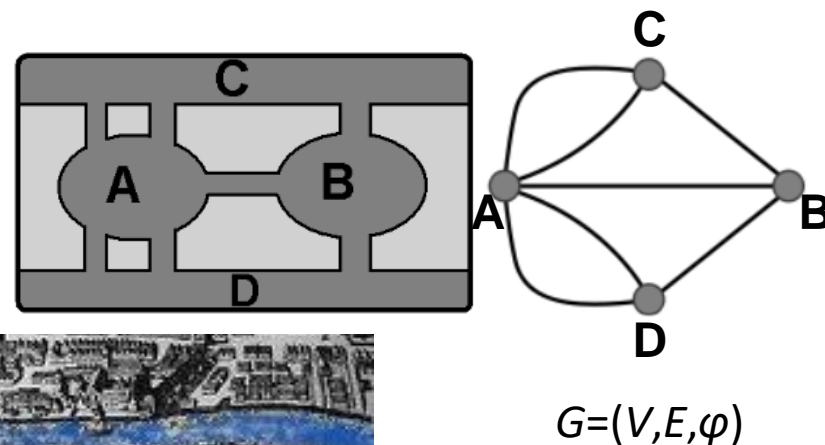
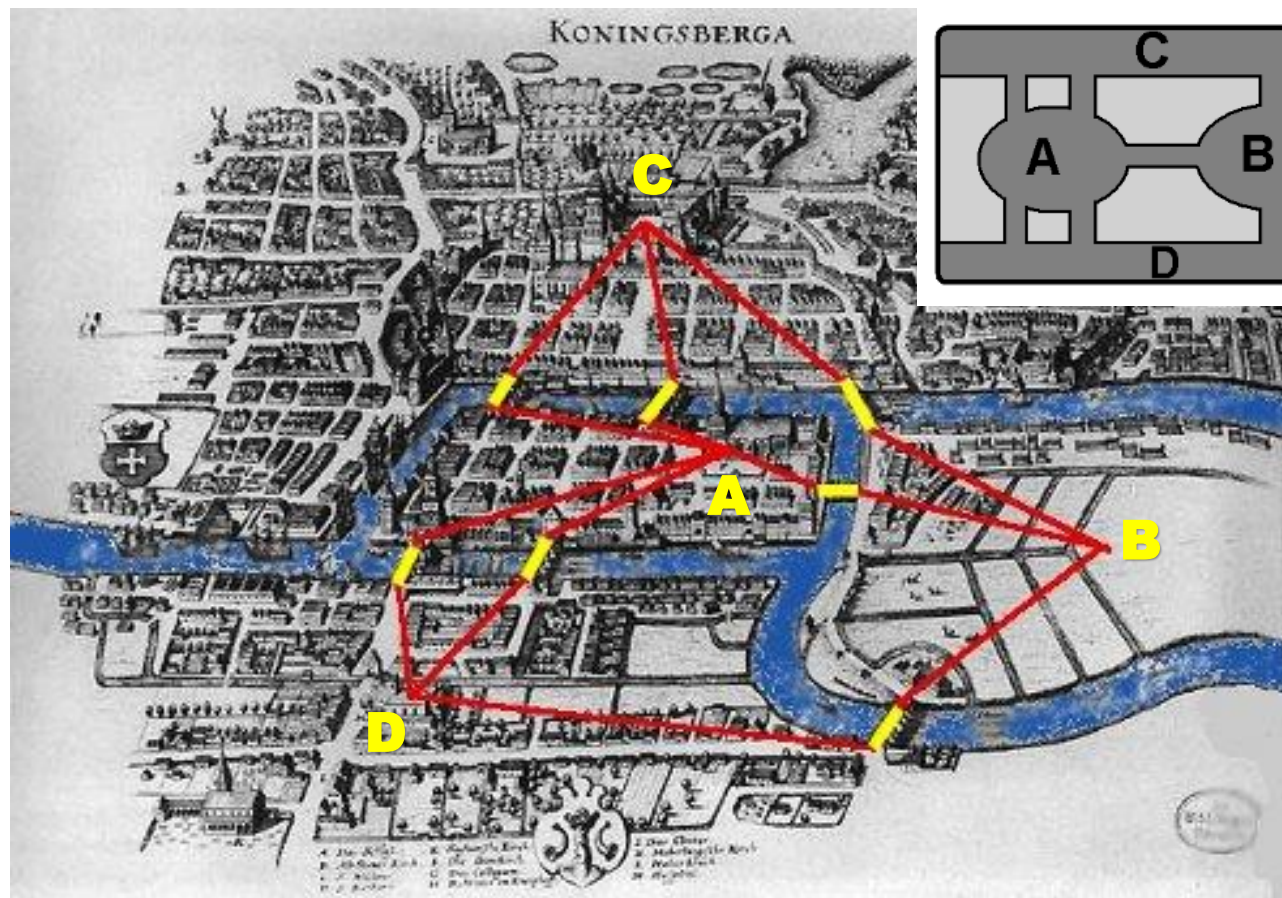
3. OPTIMIRANJE RUTA OBILASKA

- Cilj: *obići sve ulice uz najmanje ponavljanja odnosno prijeđenih kilometara*
- Ograničenja: *kapacitet vozila, regulacija prometa*



3.1 Teorija grafova

- Je li moguće prijeći preko svih sedam mostova bez ponavljanja?
(problem Koeningsberških mostova, Leonhard Euler, 18. st.)



- NE, jer je broj vrhova neparnog stupnja različit od 2 (poopćenje problema).

Neki osnovni pojmovi

- **Graf:** skup bridova¹ i vrhova², primjerice bridovi su ulice, a vrhovi su raskrižja ili neki drugi infrastrukturni objekti.
- **Težinski graf:** uključuje funkciju koja bridovima pridružuje težine (pondere), primjerice duljina, vrijeme, trošak...
- **Šetnja** u grafu je naizmjenični niz vrhova i bridova, a **staza** je šetnja u kojoj su svi bridovi međusobno različiti.
- **Put** u grafu je staza čiji su vrhovi međusobno različiti. Put koji počinje i završava u istom vrhu naziva se **ciklus**.
- **Eulerova staza** je staza koja sadržava svaki brid grafa (točno jedanput!), a ukoliko se početni i završni vrh podudaraju, naziva se **Eulerova tura**.
- *Povezani graf* je **Eulerov graf**³ ako mu je svaki vrh *parnog stupnja*. Povezani graf koji nije Eulerov sadržava Eulerovu stazu ako ima točno dva vrha neparnog stupnja.
- U matematičkom modeliranju koriste se neusmjereni, usmjereni i mješoviti *težinski grafovi*.

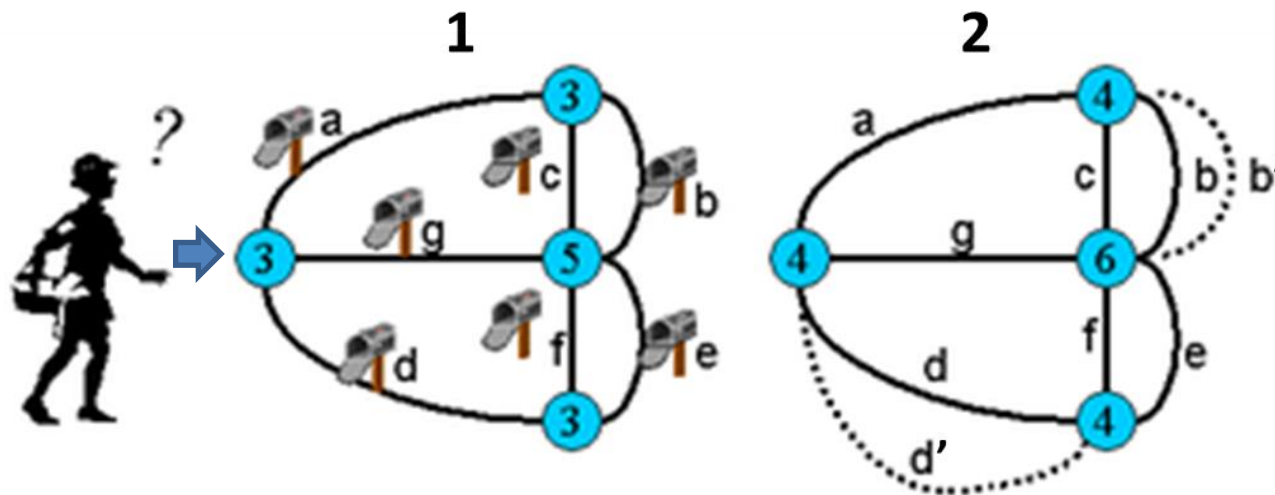
¹ Bridovi se još nazivaju i *lukovi*.

² Vrhovi se još nazivaju i *čvorovi*.

³ *Eulerov graf* dopušta *Eulerovu turu*.

3.2 Problem kineskog poštara, *eng. Chinese Postman Problem – CPP* (Kwan Mei-Ko, 1962.)

- Poštar mora proći svakom ulicom da bi isporučio poštu i želi minimizirati broj ponovnih prolazaka istom ulicom, koji se ne mogu izbjeći jer graf nije Eulerov (1).
- Ponovni prolazak istom ulicom prikazan je na grafu kao dodani brid (2).
- Dodani bridovi (točkasta crta) omogućuju da svaki vrh grafa (2) bude parnog stupnja, tj. izvršena je *eulerizacija* grafa.
- U modificiranom grafu (2) može se odrediti *Eulerova tura*, primjerice: $a-b-c-b'-e-f-g-d-d'$, pri čemu se u stvarnosti ponavljaju bridovi b i d .
- Cilj: **pronaći Eulerovu turu najmanje duljine** (zbroj duljina bridova).
- Praktični primjeri primjene *CPP-a*: planiranja ruta javnog javnog prijevoza, vozila za skupljanje otpada, vozila za čišćenje ulica, šišanje trave oko autoceste...



4. PRIMJER: *Prikupljanje i odvoz otpada u urbano ruralnom području – Studija slučaja*

- Obuhvaćeno razdoblje
 - Pet godina
- Struktura ulaznih podataka
 - izvješće o odloženom komunalnom otpadu (odlagalište)
 - raspored odvoza otpada (operativne ekipe/rajoni/tjedni)
 - ukupna kilometraža
 - rute prikupljanja
 - transportna sredstva na raspolaganju za organizaciju usluge prikupljanja i odvoza otpada (vozni park).

4.1 ANALIZA PO RAJONIMA

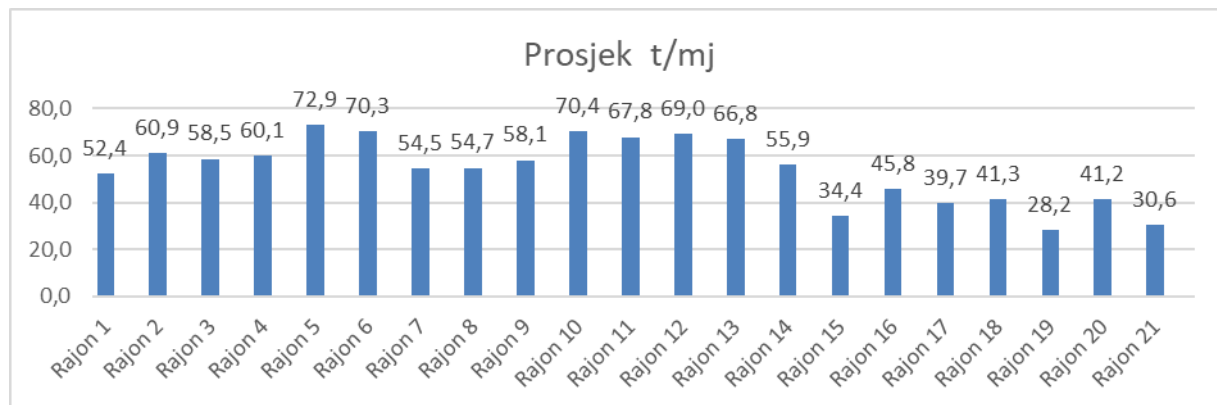
4.1.1 PODRUČJE PRIKUPLJANJA OTPADA (MKO)

- Područje prikupljanja podijeljeno na rajone.
- Unutar rajona određene su rute obilaska s obzirom na značajke rajona (urbano/ruralno) i vrstu otpada koji se prikuplja.
- MKO prikuplja se dinamikom od dva puta tjedno u urbanom dijelu, odnosno jednom tjedno u ruralnom dijelu rajona.
- Operativna ekipa obilazi rajon po određenoj ruti, te nakon odvoza otpada na odlagalište, nastavlja obilazak na lokaciji gdje je obilazak prethodno prekinut, sve dok se ne obiđe cijeli rajon odnosno ruta.
- Tijekom pojedinih mjeseci prikupljanje se obavlja sa samo jednim odvozom na odlagalište, dok su u ostalim mjesecima potrebna dva odvoza.

4.1.2 OSTVARENI RADNI UČINAK PO RAJONIMA

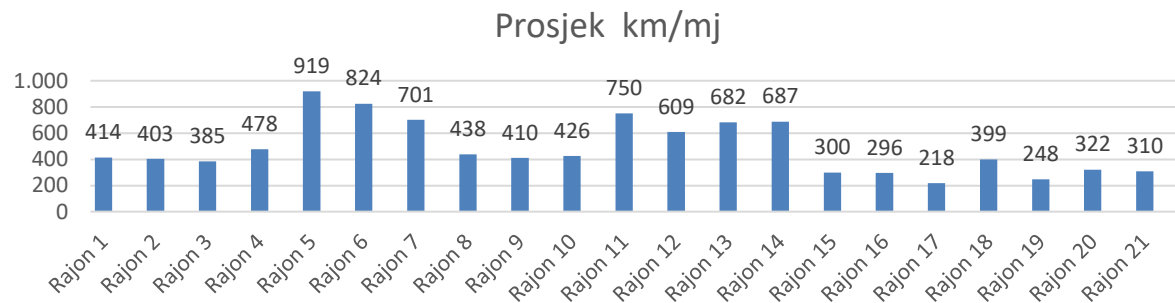
- Prikupljene količine prosječno mjesečno

Prosječno	53,97
Standardna devijacija	13,78
Koeficijent varijacije	26%



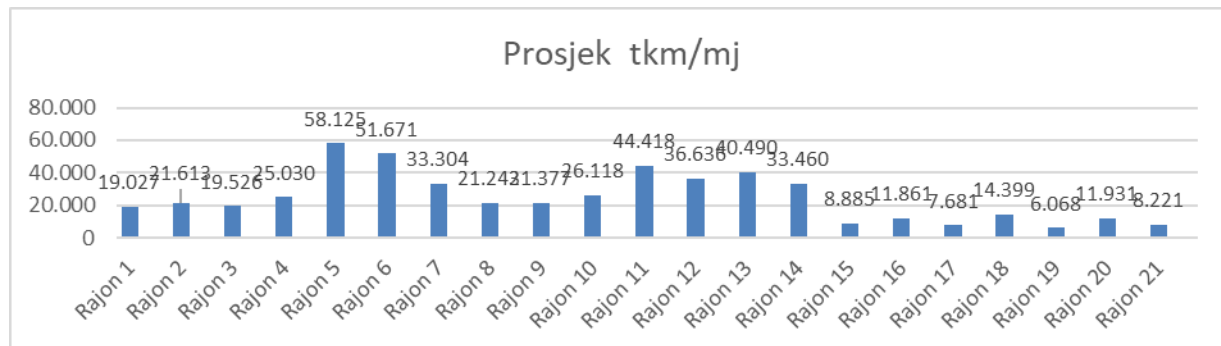
- Prijeđeni kilometri prosječno mjesečno

Prosječno	486,51
Standardna devijacija	201,20
Koeficijent varijacije	41%



- Ostvareni rad (tonski kilometri) prosječno mjesečno

Prosječno	24.814
Standardna devijacija	14.936
Koeficijent varijacije	60%



4.2 ANALIZA PO EKIPAMA

4.2.1 RASPORED OPERATIVNIH EKIPA

- Svaka od ukupno sedam ekipa prikuplja otpad u više različitih rajona tijekom tjedna (raspored po danima), kako bi se time kompenzirale razlike u potrebnom radu (tkm) pri prikupljanju otpada po rajonima (KV okruga 60%, KV ekipa 31%).
- Pokazatelji radnog učinka operativnih ekipa:
 - prikupljene količine otpada (tone),
 - prijeđeni kilometri,
 - ostvareni tonski kilometri (tkm).
- Uspostavljeni model prikupljanja MKO-a periodički se ponavlja.

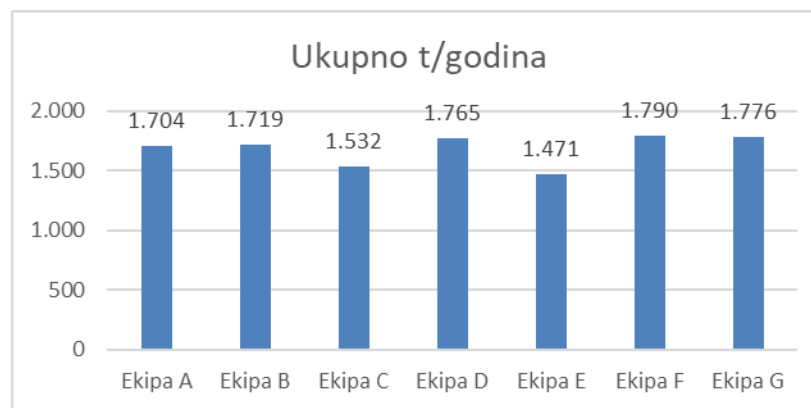
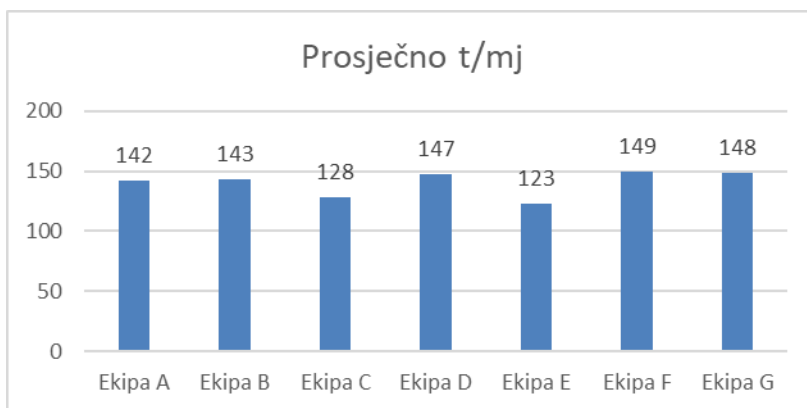
	RASPORED EKIPA PO DANIMA/RAJONIMA				
Ekipa	Ponedjeljak	Utorak	Srijeda	Četvrtak	Petak
Ekipa A	Rajon 3	Rajon 10	Rajon 15	Rajon 3	Rajon 10
Ekipa B	Rajon 2	Rajon 9	Rajon 16	Rajon 2	Rajon 9
Ekipa C	Rajon 1	Rajon 8	Rajon 17	Rajon 1	Rajon 8
Ekipa D	Rajon 4	Rajon 11	Rajon 18	Rajon 4	Rajon 11
Ekipa E	Rajon 7	Rajon 14	Rajon 21	Rajon 7	Rajon 14
Ekipa F	Rajon 6	Rajon 13	Rajon 20	Rajon 6	Rajon 13
Ekipa G	Rajon 5	Rajon 12	Rajon 19	Rajon 5	Rajon 12

4.2.2 PRIKUPLJENE KOLIČINE MKO-a

- Tablični prikaz prikupljenih količina **MKO-a u tonama (t)** prosječno mjesečno i ukupno godišnje

Ekipa	PROSJEČNO					t/mj	UKUPNO t/godina
	Ponedjeljak	Utorak	Srijeda	Četvrtak	Petak		
Ekipa A	26,32	34,83	29,87	24,59	26,38	142	1.704
Ekipa B	24,53	27,51	39,82	28,42	22,98	143	1.719
Ekipa C	20,79	25,21	34,51	24,78	22,35	128	1.532
Ekipa D	27,04	36,80	35,94	25,18	22,16	147	1.765
Ekipa E	19,02	28,62	26,57	28,34	20,00	123	1.471
Ekipa F	28,24	28,19	29,87	32,91	29,92	149	1.790
Ekipa G	42,70	32,44	24,55	20,73	27,60	148	1.776
					Prosjek	139,96	1.679,46
					Standardna devijacija	10,57	126,81
					Koeficijent varijacije	8%	8%

- Grafički prikaz prikupljenih količina **MKO u tonama (t)** prosječno mjesečno i ukupno godišnje

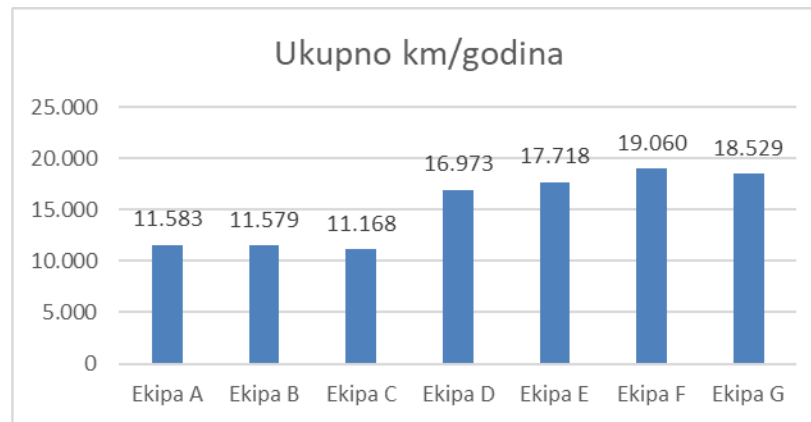
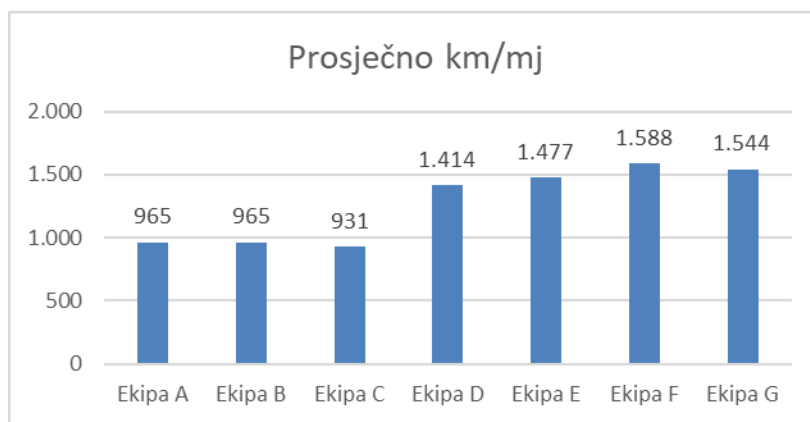


4.2.3 PRIJEĐENI KILOMETRI

- Tablični prikaz **prijeđenih kilometara** prosječno mjesečno i ukupno godišnje

Ekipa	PROSJEČNO						km/mj	UKUPNO km/godina
	Ponedjeljak	Utorak	Srijeda	Četvrtak	Petak			
Ekipa A	192	184	261	143	186	965	11.583	
Ekipa B	165	174	258	186	183	965	11.579	
Ekipa C	150	187	190	210	194	931	11.168	
Ekipa D	148	353	347	268	299	1.414	16.973	
Ekipa E	286	299	269	324	299	1.477	17.718	
Ekipa F	342	334	280	374	258	1.588	19.060	
Ekipa G	359	257	216	439	273	1.544	18.529	
					Prosjek	1.269,17	15.230,00	
					Standardna devijacija	300,29	3.603,49	
					Koeficijent varijacije	24%	24%	

- Grafički prikaz **prijeđenih kilometara** prosječno mjesečno i ukupno godišnje

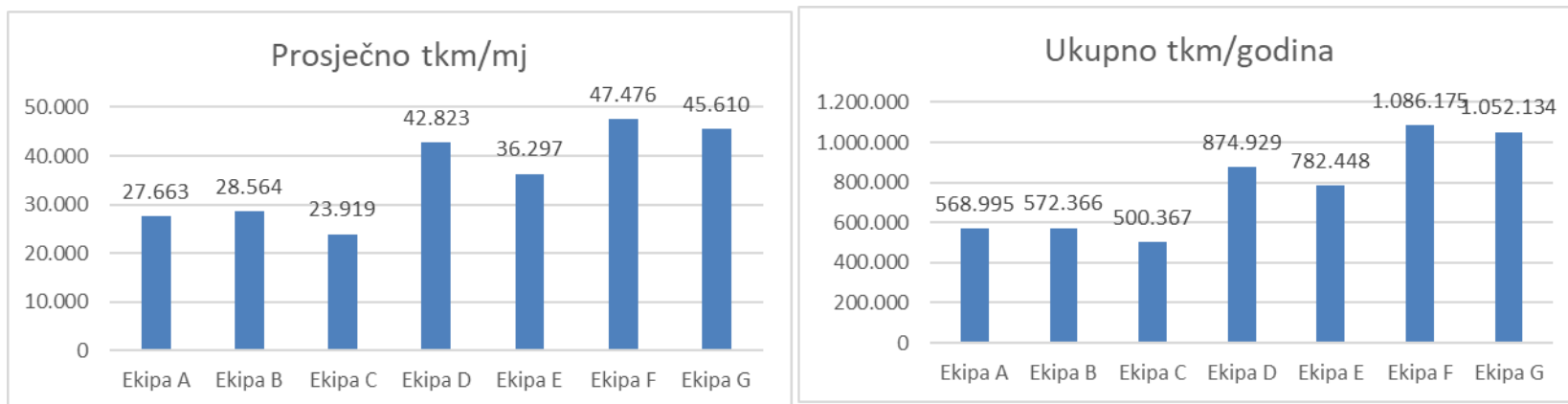


4.2.4 OSTVARENI RADNI UČINAK (tkm)

- Tablični prikaz **ostvarenih tkm** prosječno mjesečno i ukupno godišnje

Ekipa	PROSJEČNO					tkm/mj	UKUPNO tkm/godina
	Ponedjeljak	Utorak	Srijeda	Četvrtak	Petak		
Ekipa A	5.046	6.420	7.790	3.510	4.898	27.663	568.995
Ekipa B	4.044	4.784	10.259	5.275	4.201	28.564	572.366
Ekipa C	3.118	4.725	6.547	5.198	4.331	23.919	500.367
Ekipa D	3.996	13.003	12.462	6.742	6.620	42.823	874.929
Ekipa E	5.433	8.550	7.159	9.180	5.975	36.297	782.448
Ekipa F	9.651	9.428	8.351	12.322	7.724	47.476	1.086.175
Ekipa G	15.350	8.331	5.292	9.104	7.533	45.610	1.052.134
					Prosjek	36.050,44	776.773,45
					Standardna devijacija	9.499,37	238.947,21
					Koeficijent varijacije	26%	31%

- Grafički prikaz **ostvarenih tkm** prosječno mjesečno i ukupno godišnje



4.3 ANALIZA VOZNOG PARKA

- Vozila koja se koriste za prikupljanje otpada, kategorizirano prema određenim kriterijima, primjerice:
 - Nosivost vozila (t/m^3)
 - Konstrukcija/namjena vozila
 - Starost vozila
- Ukupni broj vozila apsolutno i po kategorijama.
- Vozila u pričuvi?

4.4 ZAKLJUČAK

- Temeljem povijesnih podataka o količina prikupljenog MKO-a po mjesecima i godišnje, određen je prognostički model za procjenu očekivanih količina u predstojećem razdoblju.
- Vjerodostojnost rezultata ograničena je veličinom uzorka (vremenski obuhvat) i visokim vrijednostima koeficijenta varijacije ulaznih podataka.
- Utvrđena je neujednačenost radnog opterećenja odnosno količine rada potrebnog za prikupljanje MKO-a po rajonima zbog
 - različitog broja, disperziranosti i strukture korisnika;
 - promjena nastalih od vremena kada su rajoni definirani.
- Kako bi se kompenzirala neujednačenost očekivanog radnog opterećenja po rajonima, istu treba uzeti u obzir kod slaganja novog rasporeda operativnih ekipa.
- Nedovoljna ujednačenosti radnog opterećenja operativnih ekipa (ostvareni tkm) onemogućuje postizanje optimalnog iskorištenja resursa.