

Primljen / Received: 22.10.2014.

Ispravljen / Corrected: 13.2.2015.

Prihvaćen / Accepted: 20.2.2015.

Dostupno online / Available online: 1.8.2015.

# Novi pristupi u određivanju učinaka građevinskih strojeva

## Autori:



Prof.dr.sc. **Mária Kozlovská**, dipl.ing.građ.  
maria.kozlovska@tuke.sk



**Marek Krajňák**, dipl.ing.građ.  
marek.krajnak@tuke.sk



**Lenka Sirochmanová**, dipl.ing.građ.  
lenka.sirochmanova@tuke.sk



Izv.prof.dr.sc. **Renáta Bašková**, dipl.ing.građ.  
renata.baskova@tuke.sk



Doc.dr.sc. **Zuzana Struková**, dipl.ing.građ.  
zuzana.strukova@tuke.sk

Tehničko sveučilište u Košicame, Slovačka  
Građevinski fakultet  
Institut za građevinsku tehnologiju i menadžment

Stručni rad

**Mária Kozlovská, Marek Krajňák, Lenka Sirochmanová, Renáta Bašková, Zuzana Struková**

## Novi pristupi u određivanju učinaka građevinskih strojeva

Izbor strojeva za različite građevinske radove mora se temeljiti na stvarnim uvjetima i postizanju njihove maksimalne učinkovitosti. Najvažniji parametar pri izboru građevinske mehanizacije jest specifikacija tih strojeva, koja ovisi o njihovoj primjeni u određenim uvjetima. Dosadašnja istraživanja pokazuju da izbor građevinskih strojeva ovisi o nizu varijabli čije su vrijednosti stohastičke prirode. Ovo istraživanje uspoređuje deterministički i stohastički pristup u specifikaciji tehničkih i planiranih učinaka građevinskih strojeva.

### Ključne riječi:

građevinski strojevi, učinak stroja, stohastički pristup, deterministički pristup

Professional paper

**Mária Kozlovská, Marek Krajňák, Lenka Sirochmanová, Renáta Bašková, Zuzana Struková**

## New approaches to specifying performance of construction machinery

The use of construction machinery for various construction processes must be based on the confrontation of actual conditions with the requirements for its maximum efficiency. The most important parameter for selecting construction machinery is its performance, which varies depending on its utilisation in specific conditions. Studies conducted so far show that the selection of construction machinery depends on a number of variables whose values are stochastic in nature. The present research aims at comparing the deterministic and stochastic approaches for the specification of technical and operational performance of construction machinery.

### Key words:

construction machinery, performance of machinery, stochastic approach, deterministic approach

Fachbericht

**Mária Kozlovská, Marek Krajňák, Lenka Sirochmanová, Renáta Bašková, Zuzana Struková**

## Neue Verfahren zur Ermittlung der Leistung von Baumaschinen

Die Anwendung von Maschinen für verschiedene Bauarbeiten muss auf wirklichen Konditionen und dem Erzielen maximaler Effizienz beruhen. Der wichtigste Parameter bei der Auswahl von Baumaschinen bezieht sich auf Spezifikationen, die von der Anwendung unter verschiedenen Bedingungen abhängig sind. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass die Auswahl von Baumaschinen durch eine Reihe an Variablen stochastischer Natur bedingt ist. Diese Untersuchung befasst sich mit dem Vergleich deterministischer und stochastischer Methoden zur Spezifikation technischer und planmäßiger Leistungen von Baumaschinen.

### Schlüsselwörter:

Baumaschinen, Leistung von Baumaschinen, stochastische Verfahren, deterministische Verfahren

## 1. Uvod

Kod upravljanja projektom (i svakom projektom aktivnosti) moramo navesti probleme u vezi sa strojevima i opremom, posebno sa stajališta njihove učinkovitosti. Izbor strojeva se obavlja u pripremnoj fazi građenja. Jedan od osnovnih zadataka pripreme je postupak odabira određenih vrsta građevinskih strojeva. Najvažniji parametar u izboru strojeva je njihov učinak. To je glavna karakteristika na temelju koje se određuje potreba za pojedinim strojem. Učinak stroja prema slovačkim tehničkim normama (STN), a to je i ISO 9245 (samohodni strojevi, učinkovitost stroja, simboli i jedinice) [1], mjeri se volumenom materijala koji se obrađuje u jedinici vremena. Proizvođači strojeva su definirali tehnički učinak stroja, a odnosi se na rad stroja u "idealnim uvjetima". Temelji se na osnovnom izračunu i eksperimentalnoj provjeri u proizvodnji. Također je poznat kao oznaka učinka, a nalazi se u podacima o stroju. Tehnički (ili teorijski) učinak [2] predstavlja maksimalni učinak stroja bez zastoja, koji se događaju u stvarnim uvjetima na gradilištu. Stoga teorijski učinak je maksimalan, a može se izmjeriti na osnovi rada stroja, bez gubitka vremena i kvarova, u optimalnim uvjetima. Teorijski učinak obično služi za usporedbu učinaka sličnih strojeva, s obzirom na njihov izgled. Stvarni učinak stroja pokazuje realne uvjete na gradilištu, koji obično smanjuju učinkovitost strojeva. Po tehničkom učinku se u praksi očituje učinkovitost stroja, a što služi kao ulazni podatak u postupak izbora strojeva. Postoji mnogo razloga zbog pojave zastoja rada strojeva u stvarnim uvjetima.

Stvarni učinak stroja, poznat i kao planirani učinak, označava stvarnu dodanu vrijednost na gradilištu. Dakle, stvarni učinak najvažnije je svojstvo stroja jer uzima u obzir primjerice način rada stroja sa svim tehnološkim zastojima te sposobnostima osobe koja strojem upravlja. Planirani učinak nastoji što bolje odrediti vrijednost stvarnog učinka nekog stroja, prilikom čega se u obzir uzimaju zastoji u radu koji se događaju zbog same tehnologije, odnosno načina rada stroja i osobe koja njime upravlja. Iz tog razloga, dodatni čimbenici su uzeti u obzir. Ti čimbenici prikazuju uvjete rada na gradilištu, tehničko stanje građevinske mehanizacije, razinu organizacije građenja, vrijeme, vještine i motivaciju zaposlenika itd. Prema dosadašnjoj literaturi, uvjeti na gradilištu se objedinjuju u izračunu koeficijenta iskoristivosti (tehničkog stanja stroja i proces rada) i koeficijenta utrošenog vremena (neaktivnost stroja) [2].

U literaturi postoji nekoliko definicija učinka građevinskih strojeva. Karim i Marosszeky [3] definirali su učinak kao operativno upravljanje troškovima, uključujući financijske i nefinancijske pokazatelje učinka. Oni navode da je učinak građevinskih strojeva proces ponovnog razmišljanja i preispitivanja proizvodnog (ili tehnološkog) procesa gradnje kako bi se ostvarilo značajno poboljšanje uspješnosti pri gradnji. Reichelt i Lyneis [4] kreirali su model koji prikazuje projekt kao složeni dinamički sustav. Al-Momani [5] je

zaključio da se zadovoljstvo učinkom stroja može definirati kao razlika između onoga što investitor očekuje i onoga što izvođač napravi. Navon [6] je definirao učinak stroja kao razliku između traženog i ostvarenog učinka. Ugwu Haupt [7] klasificirali su ključne pokazatelje učinka kao specifične s obzirom na gradilište i specifične s obzirom na projekt. Uspješna realizacija građevinskog projekta (ili njegovog dijela) znatno ovisi o građevinskoj mehanizaciji. Stoga je nužno odabrati potrebnu opremu u ranoj fazi planiranja projekta. Strojevi se obično biraju prema učincima (maksimalni učinak za najnižu cijenu). Primjenom multikriterijske analize u konačnom izboru, rezultati su mnogo precizniji. Casals i suradnici [8] definirali su kriterije i prikladne metode za izbor građevinskih strojeva (tablica 1.) koje se temelje na ideji da građevinske strojeve treba birati prema radnom učinku.

Tablica 1. Metodologija [8]

Kriterij	Primijenjena metoda analize
Optimalni učinak	minimalna cijena po satu maksimalni učinak po satu
Minimalni rizik	minimalni kriterij rizika je rezultat zbroja svih rizika
Minimalni utjecaj na okoliš	minimalni utjecaj na okoliš je rezultat zbroja svih utjecaja, ocjenjivanje tih utjecaja je provedeno metodom identifikacije i procjene utjecaja na okoliš, koja se temelji na sustavu upravljanja okolišem, a sastavni je dio norme ISO 14001

Casals i suradnici [8] definirali su faktore koji utječu na izvedbu građevinskih strojeva:

- rutinska kašnjenja (faktori koji neizbježno nastaju pri upotrebi opreme, niti jedan stroj ne može kontinuirano koristiti maksimalnu snagu)
- ograničenja u optimalnom mehaničkom radu (efekt smanjenja produktivnosti, zbog ograničenja u optimalnom radu)
- uvjeti na gradilištu (različiti faktori koji utječu na učinak)
- upravljanje i nadzor (organizacija rada, planiranje i odluke u upravljanju mogu biti prepreke za maksimalni učinak stroja).

Postoji nekoliko istraživanja u kojima su stvoreni različiti alati za optimalizaciju upotrebe građevinske mehanizacije. Milajić i suradnici [9] opisali su metodologiju primjene genetskih algoritama pri rješavanju problema optimalnog raspoređivanja zadataka za radnike koji upravljaju strojevima, s ciljem postizanja maksimalne učinkovitosti.

Bezak i Linarić [10] stvorili su metodologijski pristup za proračun satnog učinka građevinskih strojeva za zemljane radove. Dražić i suradnici [11] opisivali su faktore koji uzimaju u obzir neproduktivne faze rada građevinskog stroja u optimiziranju izbora građevinskih strojeva.

Izetbegović i Bezak [12] za tu su svrhu koristili grafičku simulaciju modela primjenom poznatog računalnog programa *Stroboscope*. Druga istraživanja su usmjerena na izbor strojeva i grupa strojeva za građenje prema kriterijima optimalizacije: kvaliteta, vrijeme, potrošnja energije [13-15]. Hewage i suradnici [16] pokazali su mogućnost smanjenja utjecaja zastoja na radu povećanjem motivacije radnika, odnosno upravljanjem ljudskim potencijalima. Rezultati su pokazali da udio djelotvornog vremena rada radnika iznosi samo 51 % ukupnog radnog vremena. Ostatak vremena se odnosi na pripreme aktivnosti (16 %), prijevoz na gradilište (8 %), nadzor (3 %), dnevni odmor (9 %), zastoje u radu (9 %) i druge aktivnosti (4 %). Te vrijednosti pokazuju da djelotvornost radnika ovisi o organizaciji rada i kontroli svih aktivnosti na gradilištu. Radziszewska-Zielina i suradnici [17] uočili su da učinak strojeva ovisi o kapacitetu stroja (snaga motora), o stanju na terenu (propusno tlo i vremenski uvjeti), kao i o čimbenicima koji utječu na radnike (udobnost na poslu, zdravstveno stanje, stres, umor). Ispitivanje je pokazalo da je najveći utjecaj na rad građevinskih strojeva povezan s psihofizičkim stanjem radnika (iskustvo, umor, zdravstveno stanje i motivacija) te s tehničkim parametrima stroja i stanjem organizacije. U najmanjoj mjeri na učinak stroja utječu vremenski uvjeti.

Kvaliteta odabira građevinske mehanizacije značajno utječe na prihvatljivost troškova gradnje, posebice kad je riječ o linijskim projekatima. Udio građevinske mehanizacije u građevinskim radovima iznosi od 10 do 50 %, a to nije beznačajno kad je u pitanju ekonomika građenja [18]. Prema mišljenju Assakkafa [19], do 35 % troškova građevinskih strojeva treba usmjeriti na održavanje i popravke. Uštede u ovom dijelu dovest će do lošeg tehničkog stanja stroja, smanjenja učinka, niske kvalitete rada i povećanog rizika od ozljeda ili ekoloških nesreća, dugotrajnijih zastoja u radu zbog kvarova na strojevima i dr. Abu Shaban [20] navodi da je problem vezan za učinke građevinskih strojeva često skup i rezultira konfliktima, a utječe na razvoj građevinske industrije. Projektni tim mora imati jasnu misiju i viziju kako bi osmislio i ocijenio učinke građevinskih strojeva. Važno je imati na umu sve nedostatke koji se pojavljuju u radu strojeva, kako bi se problemi pravodobno mogli riješiti. Na učinak strojeva utječe velik broj faktora, a većina ih je stohastičke prirode.

Dakle, za izbor strojeva moguće je, osim dosadašnjeg determinističkog pristupa, primjenjivati i stohastičke metode koje se temelje na teoriji vjerojatnosti. Cilj ovog istraživanja jest usporediti deterministički i stohastički pristup pri izboru tehničkih i planiranih učinaka građevinskih strojeva.

## 2. Metodologija za istraživanje izbora građevinskih strojeva

Za analizu prethodno opisanog istraživačkog problema poslužit će projekt izgradnje armiranobetonske konstrukcije

projekta *Eco Point Office Center Košice*. Na temelju podataka prikupljenih na tom projektu provodi se određivanje tehničkog i planiranog učinka građevinskog stroja.

Rješenje se sastoji od sljedećih koraka:

- Karakteristike gradnje i učinak strojeva za transport i ugradnju svježeg betona na monolitnu konstrukciju postojećeg građevinskog projekta.
- Proračun tehničkog učinka građevinskog stroja za ugradnju betona može se provoditi determinističkim pristupom koji se temelji na tehničkim specifikacijama primijenjene građevinske mehanizacije, uzimajući u obzir posebne uvjete projekta. Stohastički pristup je također uzet u obzir pri izračunu slučajnih zastoja u radu stroja.
- Određivanje planiranog učinka građevinskih strojeva provedeno je stohastičkim (mjeranjem radnog ciklusa toranjske dizalice) i determinističkim pristupom (prosječnim trajanjem radnog ciklusa).
- Usporedba prikupljenih podataka za tehnički i planirani učinak provedena je u računalnom programu *Crystal Ball*.

Stohastički model se temelji na principu ravnoteže statističkih serija, koja se odnosi na kvantitativnu karakterizaciju slučajnih događaja preko slučajnih varijabli. Opseg slučajnih varijabli varira u zadanom intervalu prema distribuciji vjerojatnosti [21].

Procesi i aktivnosti, odnosno slučajna djelovanja, mogu se prikazati metodom simulacije *Monte Carlo*. Ta metoda primjenjuje računalni program *Crystal Ball*. To omogućuje stvaranje stohastičkih modela specifikacijom slučajnih varijabli i primjenom distribucije vjerojatnosti [22].

## 3. Novi pristupi u određivanju učinaka građevinskih strojeva

Provodi se usporedba determinističkog i stohastičkog pristupa u analizi slučaja izgradnje armiranobetonske konstrukcije projekta *Eco Point Office Center Košice*. Promatran je grupni rad građevinskih strojeva u procesu ugradnje betona - toranjska dizalica s posudom za beton i automiješalica za beton - ugradnja betona u stropnu konstrukciju na trećem katu. Tehnički i operativni učinak tih strojeva je određen deterministički i stohastički.

Strojevi koji su izabrani za ugradnju betona:

- toranjska dizalica *POTAIN 15/15C* s posudom za beton (masa posude: 300 kg, zapremnina posude: 1 m<sup>3</sup>)
- automiješalica *Renault Kerax 375* s normalnim kapacitetom punjenja 8 m<sup>3</sup>.

Na slici 1. prikazan je smjer kretanja napunjene automiješalice iz betonare do gradilišta (crvena linija: 1,7 km) i smjer puta prazne automiješalice od gradilišta do betonare (plava linija: 1,1 km).



Slika 1. Smjer puta automiješalice

### 3.1. Određivanje tehničkog učinka grupe strojeva determinističkim pristupom

Tehnički učinak stroja s cikličkim radom određuje se kao kvocijent, gdje djeljenik predstavlja količinu rada u jednom ciklusu, a djelitelj predstavlja trajanje ciklusa:

$$Q = \frac{3600 \cdot q}{t_c} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1)$$

Izrazi znače sljedeće:

- $Q_t$  - tehnički učinak [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],
- $q$  - količina rada koju obavi stroj u jednom ciklusu [ $\text{m}^3$ ],
- $t_c$  - trajanje jednog radnog ciklusa [s].

Proračun se temelji na specifikacijama odabranih tehničkih učinaka grupe strojeva, koje podrazumijevaju posebne uvjete za strojeve na gradilištu:

- duljina transporta (1,1 km, odnosno 1,7 km),
- prometna gužva na ruti kojom vozi automiješalica (gradska gužva),
- udaljenost transporta betona pomoću toranjske dizalice (treći kat).

Tehnički parametri toranjske dizalice *POTAIN 15/15C*:

- vertikalni transport (podizanje posude): 38,5 m/min
- horizontalni transport (kretanje posude na dizalici): 58 m/min
- horizontalni transport (okretanje dizalice): maks. 0,8 rot./min
- vertikalni mikrotransport: maks. 3,5 m/min

Brzine transporta su različite. Variraju ovisno o težini opterećenja kao i o tehničkim parametrima toranjske dizalice. Trajanje radnog ciklusa toranjske dizalice je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Vrijeme radnog ciklusa toranjske dizalice *POTAIN 15/15C*

Radni ciklus toranjske dizalice	Trajanje ciklusa [s]
Punjenje posude svježim betonom ( $t_1$ )	60
Transport posude na mjesto betoniranja + vrijeme manevra ( $t_2$ )	70
Pražnjenje posude ( $t_3$ )	30
Transport posude na mjesto punjenja betonom + vrijeme manevra ( $t_4$ )	51
<b>Ukupno <math>t_c</math>:</b>	<b>211</b>

Toranjska dizalica *POTAIN 15/15C* prenosi kubični metar svježeg betona u jednom radnom ciklusu. U ciklusu koji traje 211 sekundi, tehnički učinak dizalice iznosi 17,05  $\text{m}^3/\text{h}$ . Tehnički parametri automiješalice Renault Kerax 375 s obzirom na radni ciklus prikazani su u tablici 3.

- prosječnu brzinu na gradskim cestama: 30 km/h
- nominalni kapacitet punjenja: 8  $\text{m}^3$
- vrijeme manevra (u radnom ciklusu): 120 s
- brzinu pražnjenja bubnja s betonom: 0-2  $\text{m}^3/\text{min}$

Tablica 3. Trajanje radnog ciklusa automiješalice *Renault Kerax 375*

Radni ciklus automiješalice	Trajanje ciklusa [s]
Punjenje bubnja automiješalice	300
Transport automiješalice do mjesta ugradnje betona (udaljenost: 1,7 km, prosječna brzina 30 km/h)	204
Pražnjenje bubnja s betonom <sup>(1)</sup>	1688
Transport prazne automiješalice do betonare (udaljenost: 1,1 km, prosječna brzina 30 km/h)	132
Radni manevar	120
<b>Ukupno <math>t_c</math>:</b>	<b>2444</b>

<sup>(1)</sup> Trajanje pražnjenja automiješalice jednako je 8 radnih ciklusa toranjske dizalice

Automiješalica prevozi 8 m<sup>3</sup> svježeg betona u jednom radnom ciklusu. Trajanje ciklusa je 2444 s, a tehnički učinak automiješalice iznosi 11,80 m<sup>3</sup>/h. Posebno je važan učinak toranjske dizalice zbog neprekidnog betoniranja. Učinak je najvažniji dio u grupnom radu strojeva. Zbog toga su potrebne dvije automiješalice kako bi se osigurala zalihe svježeg betona. Vrijednost tehničkog učinka grupe strojeva se određuje izrazom (2). Vrijednost se određuje determinističkim pristupom, prema tehničkim specifikacijama stroja. Neke činjenice, poput nejednoliko napunjene posude za beton i odstupanja u količini svježeg betona koji se prevozi različitim automiješalicama, nisu uzete u obzir pri izračunu.

$$Q_t = \min(Q_{t1}; x Q_{t2}) \quad [m^3/h] \quad (2)$$

$$Q_t = \min(17,05 m^3/h; 2 \cdot 11,80 m^3/h) = 17,05 [m^3/h]$$

gdje je:

- $Q_t$  - tehnički učinak grupe strojeva [m<sup>3</sup>/h],
- $Q_{t1}$  - tehnički učinak toranjske dizalice [m<sup>3</sup>/h],
- $Q_{t2}$  - tehnički učinak automiješalice [m<sup>3</sup>/h],
- $x$  - broj automiješalica [kom].

### 3.2. Određivanje tehničkog učinka grupe strojeva stohastičkim pristupom

Na gradilištu *EcoPoint Office Center Košice* izmjereno je trajanje stvarnog radnog ciklusa toranjske dizalice kako bi se mogao odrediti tehnički učinak grupe strojeva primjenom stohastičkog pristupa. Statistički podaci su obrađeni u računalnom programu *Crystal Ball*. Tablica 4. prikazuje radne cikluse toranjske dizalice razvrstane po aktivnostima.

Da bi se dobile kompatibilne slučajne varijable, potrebna je distribucija vjerojatnosti na skupu podataka. Distribucija vjerojatnosti definira sve moguće vrijednosti slučajnih varijabli i bilježi njihovu mogućnost pojavljivanja u svakoj od vrijednosti. Distribucija se provodi računalnom programu *Crystal Ball* pomoću statističkih testova. Test Anderson-

Darling je postavljen na opciju automatskog izbora. Tim testom je provedena distribucija statističke vjerojatnosti na set podataka (tablica 5.).

Tablica 5. Distribucija vjerojatnosti slučajnih varijabli pojedinih aktivnosti toranjske dizalice POTAIN 15/15C

Aktivnost toranjske dizalice	Distribucija vjerojatnosti
Punjenje posude svježim betonom ( $\xi_{t1}$ )	Poissonova distribucija
Transport napunjene posude do mjesta ugradnje betona + vrijeme manevra ( $\xi_{t2}$ )	hipergeometrijska distribucija
Pražnjenje posude s betonom ( $\xi_{t3}$ )	binomna distribucija
Transport prazne posude do mjesta punjenja betonom + vrijeme manevra ( $\xi_{t4}$ )	binomna distribucija

Parametri računalnog programa *Crystal Ball*:

- razina pouzdanosti: 95 %
- broj ispitivanja: 100000
- brzina: ekstremna (upisivanje podataka svakih 0,5 s).

Vrijednost  $t_t$  je određena kao zbroj srednjih vrijednosti slučajnih varijabli od  $t_1$  do  $t_4$  primjenom stohastičkog pristupa. Nakon zamjene u izrazu (3), tehnički učinak grupe strojeva je iznosio 17,50 m<sup>3</sup>/h, kao srednja vrijednost slučajne varijable  $\xi_{Qt}$  (slika 2.). Zbog stohastičkog pristupa, rezultat je bio prikazan u obliku slučajne varijable:

$$E\xi_{Qt} = \frac{3600 \cdot q}{\xi_{t1} + \xi_{t2} + \xi_{t3} + \xi_{t4}} \quad [m^3/h] \quad (3)$$

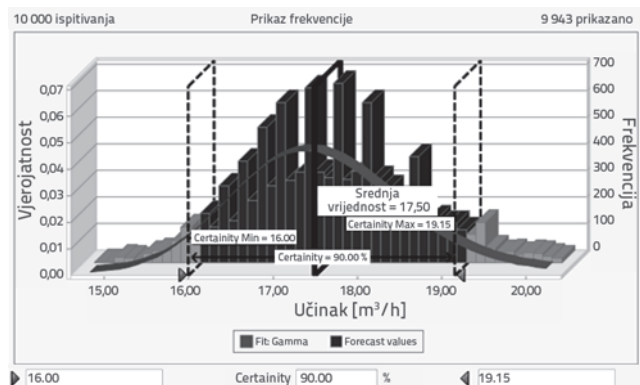
Izrazi znače sljedeće:

- $E\xi_{Qt}$  - srednja vrijednost slučajne varijable  $\xi_{Qt}$  [m<sup>3</sup>/h],
- $q$  - količina rada koju stroj napravi u jednom ciklusu [m<sup>3</sup>],
- $\xi_{t1...t4}$  - slučajna varijabla  $t_1...t_4$  [s].

Tablica 4. Statistički podaci za toranjsku dizalicu

Radni ciklusi toranjske dizalice	Broj izmjerenih radnih ciklusa toranjske dizalice POTAIN 15/15C														
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
$t_1$ - punjenje posude svježim betonom [s]	81	89	77	79	80	49	49	57	64	51	44	58	63	54	65
$t_2$ - transport posude na mjesto ugradnje betona + vrijeme manevra [s]	61	65	68	57	61	56	58	66	57	56	54	47	54	55	58
$t_3$ - pražnjenje posude s betonom [s]	34	30	25	28	33	16	33	22	17	29	32	18	25	28	34
$t_4$ - transport prazne posude na mjesto punjenja betonom + vrijeme manevra [s]	60	63	58	61	57	52	56	47	63	62	48	60	53	57	60
<b><math>t_t</math> - ukupno vrijeme [s]</b>	<b>236</b>	<b>247</b>	<b>228</b>	<b>225</b>	<b>231</b>	<b>177</b>	<b>196</b>	<b>192</b>	<b>201</b>	<b>198</b>	<b>178</b>	<b>183</b>	<b>195</b>	<b>194</b>	<b>217</b>

Kada usporedimo tehnički učinak grupe strojeva koji je određen deterministički i iznosi 17,05 m<sup>3</sup>/h s tehničkim učinkom koji je dobiven primjenom stohastičkog pristupa koji iznosi 17,50 m<sup>3</sup>/h, možemo zaključiti da je iskoristivost grupe strojeva bila maksimalna u trenutku mjerenja. Budući da je vrijednost dobivena primjenom stohastičkog pristupa dala vrlo slične vrijednosti kao i determinističkim pristupom, uvjeti u kojima strojevi rade su isti kao na gradilištu.



Slika 2. Rezultati simulacije: frekvencije slučajne varijable za tehnički učinak grupe strojeva (uključujući statističke karakteristike) u računalnom programu *Crystal Ball*

### 3.3. Određivanje planiranog učinka grupe strojeva primjenom determinističkog pristupa

Tehnički učinak grupe strojeva za spomenuto gradilište koji se temelji na tehničkim specifikacijama strojeva, a u obzir su uzeti posebni uvjeti građenja, određen je determinističkim i stohastičkim putem i prikazan je u prethodnom poglavlju.

Planiranje i upravljanje kapacitetom stroja je pretpostavka, za razliku od stvarnog učinka na gradilištu. U praksi je planirani učinak građevinskih strojeva vrlo važan. On uključuje sve podatke vezane za rad stroja. U tablici 6. su prikazani radni ciklusi toranjske dizalice prema pojedinima aktivnostima, uključujući zastoje u radu. Pri određivanju planiranog učinka grupe strojeva razmatraju se tri pojedinačne aktivnosti ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  i  $t_d$ ) i zastoji u radu ( $t_d$ ).

Determinističkim pristupom izračunan je planirani učinak grupe strojeva primjenom prosječne vrijednosti  $t_c$  (iz tablice 6). Uzeti su u obzir zastoji u radu (koeficijent iskoristivosti). Prema dostupnim podacima i primjenom formule 1 izračunan je planirani učinak grupe strojeva te iznosi 11,17 m<sup>3</sup>/h.

### 3.4. Određivanje planiranog učinka grupe strojeva primjenom stohastičkog pristupa

Planirani učinak grupe strojeva određen je stohastički u računalnom programu *Crystal Ball*. U tom slučaju distribucija vjerojatnosti je provedena direktno na vrijednost  $t_c$  (slika 3.). U proračun su uključene vrijednosti  $t_d$ , primijenjen je izraz (4):

$$E_{\xi_{Qt}}^{\xi} = \frac{3600 \cdot q}{\xi_{tc}} \tag{4}$$

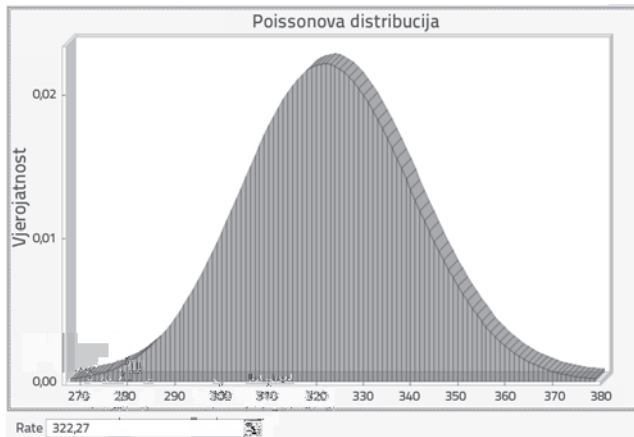
Izrazi znače sljedeće:

- $E_{\xi_{Qt}}^{\xi}$  - srednja vrijednost slučajne varijable  $\xi_{Qt}$  [m<sup>3</sup>/h],
- $q$  - količina rada koju stroj obavi u jednom ciklusu [m<sup>3</sup>],
- $\xi_{tc}$  - slučajna varijabla  $t_c$  [s].

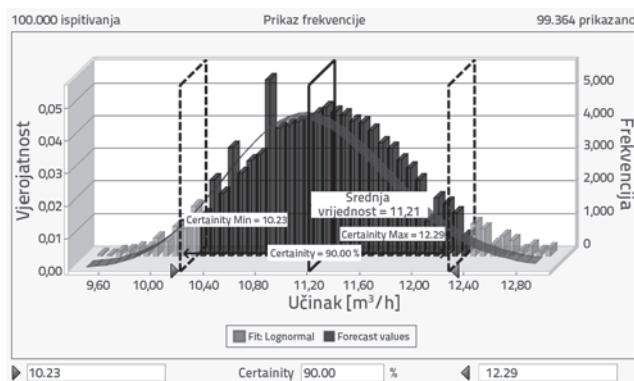
Srednja vrijednost planiranog učinka grupe strojeva je prikazana na slici 4., a iznosi 11,21 m<sup>3</sup>/h.

Tablica 6. Statistički podaci koji uključuju zastoje u radu

Radni ciklusi toranjske dizalice	Broj mjerenih ciklusa toranjske dizalice POTAIN 15/15C														
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
$t_1$ - punjenje posude svježim betonom [s]	81	89	77	79	80	49	49	57	64	51	44	58	63	54	65
$t_2$ - transport pune posude do mjesta ugradnje betona + vrijeme manevra [s]	61	65	68	57	61	56	58	66	57	56	54	47	54	55	58
$t_3$ - pražnjenje posude s betonom [s]	34	30	25	28	33	16	33	22	17	29	32	18	25	28	34
$t_4$ - transport prazne posude do mjesta punjenja + vrijeme manevra [s]	60	63	58	61	57	52	56	47	63	62	48	60	53	57	60
$t_d$ - zastoji u radu [s]	0	0	0	0	0	1140	0	0	360	0	0	0	0	240	0
<b><math>t_c</math> - ukupno vrijeme [s]</b>	<b>236</b>	<b>247</b>	<b>228</b>	<b>225</b>	<b>231</b>	<b>1313</b>	<b>196</b>	<b>192</b>	<b>561</b>	<b>198</b>	<b>178</b>	<b>183</b>	<b>195</b>	<b>434</b>	<b>217</b>



Slika 3. Distribucija vjerojatnosti slučajne varijable  $\zeta_{tc}$  u računalnom programu *Crystal Ball*



Slika 4. Rezultati simulacije: frekvencija slučajne varijable planiranog učinka grupe strojeva (uključujući osnovne statističke karakteristike) u računalnom programu *Crystal Ball*

#### 4. Usporedba determinističkog i stohastičkog pristupa

Kada uspoređujemo dobivene vrijednosti tehničkog i planiranog učinka građevinskog stroja, određene determinističkim i stohastičkim pristupom s vrijednostima stvarnog učinka na temelju podataka o izvršenju koje su ustupili radnici koji upravljaju strojevima (tablica 7.), možemo zaključiti da se vrijednosti planiranog učinka malo razlikuju od vrijednosti stvarnog učinka.

#### LITERATURA

- [1] STN ISO 9245: 1995, Earth-moving machinery. Machine productivity. Vocabulary, symbols and units.
- [2] Cais, L., Hyben, I.: Machinery operator of the construction company (In Slovak: Mechanizátorstavebnjefirmy), B & Group, Martin, 2007.
- [3] Karim, K., Marosszeczy, M.: Process monitoring for process re-engineering - using key performance indicators, International conference on construction process reengineering, CPR 99, Sydney UNSW 12-13 July 1999.

Zaključak proizlazi iz činjenice da statistički podaci (uključujući zastoje u radu) predstavljaju reprezentativan uzorak i stvarne uvjete na gradilištu. Osim toga, predviđanje zastoja u radu je važna pretpostavka za uspješno upravljanje građevinskim strojevima i opremom. Nije moguće izmjeriti ponavljajuće radne cikluse strojeva na svakom gradilištu za različite vrste strojeva. U tom kontekstu, građevinsko poduzeće može kreirati bazu učinaka za pojedine vrste građevinskih strojeva. Ti podaci su potrebni kako bi se planiranjem izbora strojeva moglo prilagoditi uvjetima na različitim gradilištima. Podaci se mogu izraziti preko koeficijenta vrijednosti, koji predstavlja iskoristivost tehničkog učinka stroja.

Tablica 7. Usporedba učinaka strojeva

Učinak	Pristup	Deterministički pristup	Stohastički pristup
Tehnički učinak [m <sup>3</sup> /h]		17,05	17,50
Planirani učinak [m <sup>3</sup> /h]		11,17	11,21
Iskoristivost tehničkog učinka [%]		66	64
Stvarni učinak [m <sup>3</sup> /h]		11,28	

#### 5. Zaključak

Uspoređujući stohastički pristup s determinističkim, možemo zaključiti da su vrijednosti učinaka gotovo jednake. Pretpostavka je da statistički podaci nisu dovoljno veliki da bi se iskoristile prednosti metode *Monte Carlo*. Unatoč tome, stohastički pristup je zanemarivo precizniji i prikazuje realnije rezultate. U slučaju kada su odnosi među varijablama složeni, bolje je primijeniti stohastički pristup, a posebno metodu simulacije *Monte Carlo*. Prema tome, ovaj pristup se može primijeniti u slučaju kad imamo mnogo različitih ulaznih podataka, dok deterministički pristup ne obuhvaća slučajnost i vjerojatnost događaja koji utječu na rad građevinskih strojeva.

#### Zahvala

Ovaj rad je dio istraživačkih rezultata na projektu *VEGA - 1/0677/14 - Istraživanje poboljšanja građevinske učinkovitosti primjenom tehnologija MMC*.

- [4] Reichelt, K., Lyneis, J.: The dynamic of project performance: Benchmarking the drivers of cost and schedule overrun, *European management journal*, 17, (1999), pp. 135-150, [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2373\(98\)00073-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2373(98)00073-5)
- [5] Al-Momani, A.H.: Examining service quality within construction processes, *Technovation*, 20, (2000), pp. 643-651, [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-4972\(00\)00002-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-4972(00)00002-X)

- [6] Navon, R.: Automated project performance control of construction projects, *Automation in Construction*, 14, (2005), pp. 467-476, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2004.09.006>
- [7] Ugwu, O.O., Haupt, T.C.: Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability - a South African construction industry perspective, *Building and Environment*, 42, (2007), pp. 665-680, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.018>
- [8] Casals, M., Forcada, N., Roca, X.: A methodology to select construction equipment, Polytechnic University of Catalonia, Department of Construction Engineering, 2003.
- [9] Milajić, A., Beljaković, D., Petronijević, P.: Genetic algorithms for assigning tasks to construction machine operators, *GRADEVINAR*, 63, (2011), 8, pp. 749-755.
- [10] Bezak, S., Linarić, Z.: Methodological approach to the calculation of machine work cost in civil engineering, *GRADEVINAR*, 61, (2009), 1, pp. 23-27.
- [11] Dražić, J., Trivunić, M., Mučenski, V., Peško, I., Nikolić, A.: Optimization in the Choice of Building Mechanization, Conference proceedings of People, Buildings and Environment 2012, Lednice, Czech Republic, (2012), pp. 102-112.
- [12] Izetbegović, J., Bezak, S.: Applying a Combined Chronometric-Simulation Method for Optimizing Operation Management in Construction, *Organization, Technology and Management in Construction*, 2, (2010), 1, pp. 156-160.
- [13] Gašparík, J. et al.: Multi-criteria optimizing method of earthwork machine group selection implemented into soil processes, *ISARC 2013 - 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*, Montreal, (2013), pp. 448-458.
- [14] Cukrov, S.: Selection of machines for excavation of water main trenches, *GRADEVINAR*, 61, (2009), 4, pp. 339-345
- [15] Struková, Z., Ištvánik, M.: Tools for mobile crane selecting and locating, *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2, (2011), pp. 69-74, <http://dx.doi.org/10.1556/IRASE.2.2011.1.11>
- [16] Hewage, N., Gannoruwa, A., Ruwanpura, J.Y.: Current status of factors leading to team performance of on-site construction professionals in Alberta building construction projects, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, (2011), pp. 679-689, <http://dx.doi.org/10.1139/I11-038>
- [17] Radziszewska-Zielina, E., Sobotka, A., Plebankiewicz, E., Zima, K.: Preliminary identification and evaluation of parameters affecting the capacity of the operator-earthmoving machine system, *Budownictwo i architektura*, 12, (2013), pp. 53-60.
- [18] Mesároš, F.: Costs for the Construction Machinery from the view of Economics of Construction, *Eurostav*, 11, (2005), pp. 60-61.
- [19] Assakkaf, I.: Ence 420 – Construction Equipment and Methods, <http://www.assakkaf.com>, 12.09.2014.
- [20] Abu Shaban, S.S.: Factors Affecting the Performance of Construction Projects in the Gaza Strip. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for Degree of Master of Science in Construction Management, The Islamic University of Gaza, Palestine, April, 2008.
- [21] Ďudák, J.: Economic-mathematical Methods (In Slovak: Ekonomicko - matematické metódy), The Faculty of Engineering Slovak University of Agriculture in Nitra, Nitra, 2003.
- [22] Korytářová, J. et al.: Management of risks associated with the delivery of construction work, 1st Edition, CERM, Brno, 2011.
- [23] Struková, Z., Líška, M.: Application of automation and robotics in construction work execution., *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2, (2012), pp. 121-125.