

Primljen / Received: 24.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2017.

Prihvaćen / Accepted: 28.2.2017.

Dostupno online / Available online: 10.8.2017.

Regresijski model za procjenu produktivnosti betoniranja armiranobetonskih ploča

Autori:



Mr.sc. **Biljana Matejević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
biljana.matejevic@gaf.ni.ac.rs



Prof.dr.sc. **Milorad Zlatanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Nišu
Građevinsko-arhitektonski fakultet
milorad.zlatanovic@gaf.ni.ac.rs

Pregledni rad

Biljana Matejević, Milorad Zlatanović

Regresijski model za procjenu produktivnosti betoniranja armiranobetonskih ploča

U radu je dan model koji omogućuje učinkovito upravljanje procesom betoniranja, još u fazi planiranja, i to procjenom produktivnosti s ciljem smanjenja troškova i ukupnog trajanja projekta. Prikupljeni su podaci tijekom 81 betoniranja ploča na osam gradilišta na kojima se grade objekti visokogradnje. Identificirani su faktori koji mogu imati utjecaj na produktivnost, te su primjenom metode višestruke linearne regresije izrađeni modeli za procjenu produktivnosti i prognoziranje trajanja procesa betoniranja ploča.

Ključne riječi:

model, produktivnost, betoniranje, višestruka linearna regresija, faktori utjecaja

Subject review

Biljana Matejević, Milorad Zlatanović

Regression model for predicting productivity of RC slab concreting process

This paper provides a model that will ensure effective management of concreting process already at the planning stage, by predicting productivity to reduce costs and shorten the project completion time. Eighty-one RC slab concreting processes were monitored and registered on eight building construction sites. The factors that may affect productivity were identified and a multiple linear regression method was used to develop models for predicting productivity and estimating duration of the slab concreting process.

Key words:

model, productivity, concreting, multiple linear regression, affecting factors

Übersichtsarbeit

Biljana Matejević, Milorad Zlatanović

Regressionsmodell für die Einschätzung der Produktivität des Betonierens von Stahlbetonplatten

Das Papier präsentiert ein Modell zu entwickeln, das eine effiziente Leitung des Betonierungsprozesses ermöglicht, und zwar noch in der Planungsphase, und dies durch Einschätzung der Produktivität mit dem Ziel der Kostensenkung und Verkürzung der gesamten Projektdauer. Während des Betonierens von 81 Platten auf acht Baustellen, auf denen Objekte des Hochbaus errichtet wurden, wurden Daten zusammengetragen. Identifiziert wurden Faktoren, die Einfluss auf die Produktivität haben können, und durch Anwendung der Methode der mehrfachen linearen Regression wurden Modelle für die Einschätzung der Produktivität und die Prognose der Dauer des Betonierungsprozesses der Platten ausgearbeitet.

Schlüsselwörter:

Modell, Produktivität, Betonieren, mehrfache lineare Regression, Einflussfaktoren

1. Uvod

Rezultati brojnih istraživanja su pokazala da u posljednjih nekoliko desetljeća u većini zemalja produktivnost u građevinarstvu ne prati rast produktivnosti u ostalim industrijskim sektorima. U nekim vodećim ekonomski razvijenim zemljama svijeta čak je zabilježen pad produktivnosti u građevinarstvu [1]. Među zemljama članicama Europske unije koje imaju raspoložive podatke za siječanj 2009. godine, građevinarstvo bilježi porast u tri, a pad u osam država [2]. Iako je to nekada bila jedna od najpropulzivnijih izvoznih gospodarskih grana, profitabilno i visoko akumulativno srpsko građevinarstvo danas dijeli sudbinu ukupne gospodarske situacije u zemlji [3].

Poznato je da produktivnost ima značajan i direktan utjecaj na troškove izgradnje investicijskog pothvata - veća produktivnost smanjuje troškove građenja i obrnuto. U građevinarstvu se produktivnost rada najčešće izražava kao količina proizvoda u jedinici vremena. Vrijeme i produktivnost usko su povezani: podaci o produktivnosti koriste se za određivanje trajanja aktivnosti, iz čega slijedi da pad produktivnosti može dovesti do kašnjenja radova. Izgradnja je dinamičan proces i teško je odrediti samo jedan faktor koji ima utjecaj na produktivnost. Mnoga istraživanja se temelje na utjecaju nekog faktora pri analizi produktivnosti, a zanemaruje se utjecaj drugih faktora koji postoje ili se njihov utjecaj eliminira uvođenjem koeficijentata rizika. Osim mjerenja produktivnosti rada u građevinarstvu, kao vrlo složenog i dugotrajnog procesa zbog specifičnosti građevinske proizvodnje, potrebno je ispitati i ocijeniti utjecaje različitih faktora na ostvarenu produktivnost.

Već dugi niz godina beton je jedan od najzastupljenijih materijala u građevinarstvu. Proces betoniranja, od njegove pripreme u tvornici, preko dopreme do gradilišta pa do ugrađivanja u konstrukciju, zajednički je proces izgradnje svih građevinskih projekata. Zbog specifičnosti betona kao građevnog materijala i različitih utjecaja (prekidi, zastoji, nepravilnosti, itd.), koji se javljaju pri ugradnji betona, nužno je posvetiti posebnu pažnju tijekom planiranja i izvođenja tih radova. Betonski radovi pri izgradnji građevinskog objekta imaju velik udio u ukupnoj količini i troškovima projekta, pogotovo ako se u visokogradnji primjenjuje skeletni sustav građenja. U takvim projektima betonski radovi predstavljaju ključne aktivnosti u dinamičkom planu izvođenja radova. Zbog toga je važno realno isplanirati izvođenje tih radova dobrim usklađivanjem svih utjecaja i osiguranjem potrebne produktivnosti. U našoj se praksi planiranje procesa ugradnje betona uglavnom svodi na iskustvo, bez razmatranja faktora koji imaju utjecaj na produktivnost tog procesa. Zbog toga dolazi do zastoja i čekanja, primjerice postoje situacije na gradilištu kada nekoliko automiješalica čeka u redu, ili autopumpa čeka dolazak automiješalice, što, logično ima negativan utjecaj na financijski plan.

Suradnja između izvođača radova i betonare zahtijeva precizno planiranje i sinkronizaciju rada kako bi se beton ugrađivao prema propisanim pravilima. Međutim, postoje situacije na

gradilištu kada izvođač mora naručiti dovoljnu količinu betona, i to u dovoljnom vremenskom razmaku prije početka ugrađivanja kako bi se osiguralo postizanje maksimalne produktivnosti na gradilištu, dok s druge strane betonara pokušava istovremeno isporučiti beton za nekoliko različitih gradilišta te povećati svoju produktivnost [4]. To nije uvijek lako ostvarivo zbog prirode betona, usklađenosti učinka betonare i učinka autopumpe, ograničenog broja automiješalica, njihovih zapremina i dr. Loše upravljanje procesom isporuke i ugradnje betona može dovesti do prekoračenja roka njegove upotrebljivosti, nedovoljne iskorištenosti postrojenja, mehanizacije i radne snage, a samim time i do dodatnih troškova.

Istraživanje područja produktivnosti u građevinarstvu nije novost, ali je to uvijek aktualna i značajna tematika. Razvojem znanosti i tehnologije razvijaju se i nove metode, poput umjetnih neuronskih mreža (eng. *Artificial Neural Networks*), simulacijske metode (eng. *Simulation Methods*), metode zaključivanja na osnovi slučaja (eng. *Case Based Reasoning*), nejasne logike (eng. *Fuzzy Logic*) i drugih koje se primjenjuju u proučavanju produktivnosti [5-12]. Velik broj znanstvenih radova obrađuje tematiku produktivnosti u građevinarstvu primjenom različitih metoda, a neki od njih su citirani u ovom radu [5-17].

U radu [13] analizirana je produktivnost radnika istraživanjem koje je provedeno na uzorku od 23 projekta zidarskih radova, 8 projekata radova na oplatama i 11 projekata radova na čeličnim konstrukcijama. Na temelju baze podataka za zidarske radove, statističkim metodama linearne regresije, razvijena je teorijska osnova za definiranje osnovne produktivnosti (eng. *baseline productivity*). Osnovna produktivnost je definirana kao produktivnost ostvarena tijekom 10 posto svih radnih dana koji su imali najbolju produktivnost.

Kod zidarskih radova vrijednosti osnovne produktivnosti su u rasponu od 0,538 do 1,829 h/m², kod oplata iznosi 0,430 do 1,237 h/m² i kod čeličnih konstrukcija od 1,022 do 2,230 h/elementu (stupu ili gredi). Koeficijent varijacije - CV (eng. *coefficient of variation*) definiran je kao odnos srednje pogreške procjene produktivnosti i procijenjene osnovne produktivnosti. Dobivene vrijednosti koeficijenta varijacije iznosile su 11,5 za zidarske radove, 9,3 za radove na oplatama i 10,6 za radove na čeličnim konstrukcijama. Na temelju baze podataka za zidarske radove postavljene su hipoteze koje su ispitivane preko druge dvije baze podataka. Potvrđena je hipoteza da složeniji projekt utječe na smanjenje produktivnosti, kao i da veći koeficijent varijacije upućuje na veću varijabilnost upravljanja ljudskim potencijalima u građevinarstvu. Niži koeficijent varijacije pokazuje na dosljedniju primjenu tehnologije i veću sposobnost radnika [13]. Dunlop i Smith [15] su analizirali produktivnost betoniranja na temelju podataka prikupljenih na uzorku od 202 betoniranja na tri gradilišta postrojenja za otpadne vode u Škotskoj. Prikupljene su vrijednosti za ploče, zidove i stupove te je dobivena srednja ostvarena produktivnost koja je iznosila 13,6 m³/h po elementu. Predložen je regresijski model za prognožiranje

produktivnosti za sve elemente (ploče, stupove i zidove) [14]. Na temelju podataka prikupljenih tijekom 418 betoniranja stupova, zidova, ploča i greda osmišljen je regresijski model za procjenu produktivnosti u Egiptu. Podaci su prikupljeni na ukupno 10 gradilišta. Beton je transportiran dizalicom, a prosječna količina betona po gradilištu po jednom betoniranju iznosila je 35,24 m³, dok je ostvarena produktivnost iznosila 11 m³/h.

U Nigeriji je ispitivana produktivnost radnika (h/m³) na temelju podataka prikupljenih tijekom 26 betoniranja temeljnih zidova, stupova, ploča i greda, a beton je transportiran damperima. Takav je oblik transporta betona u toj zemlji popularan zbog manevarskih mogućnosti dampera i načina istovara, a primjenjuje se na približno polovini svih gradilišta u toj zemlji, iako je ograničen na betoniranje temelja. Prosječna količina betona iznosila je 17,17 m³, a ostvarena produktivnost 8,53 m³/h [16]. Anson i Wang [17] su analizirali produktivnost betoniranja u Hong Kongu za različite tehnologije izvođenja radova: dizalicom, autopumpom, kolicima i lijevkom. Na uzorku od 154 betoniranja zidova, stupova, ploča i greda, dobiveni su rezultati o produktivnosti: za prijenos betona dizalicom produktivnost je iznosila 17,50 m³/h, za prijenos betona pumpom 30,40 m³/h, za prijevoz betona kolicima 17,30 m³/h.

Metoda umjetnih neuronskih mreža (eng. *Artificial Neural Networks* - ANN) primijenjena je pri istraživanju produktivnosti rada dizalice; formirani su modeli metodom višestruke linearne regresije i umjetnih neuronskih mreža, a potom su uspoređeni rezultati [6]. U Velikoj Britaniji su primijenjene neuronske mreže za procjenu produktivnosti betoniranja gotovim betonom [7]. Primijenjene su i druge relativno nove metode: metoda zaključivanja na osnovi slučajeva (eng. *Case Based Reasoning* - CBR) [8] i nejasna logika (eng. *Fuzzy logic*) [9]. Park i drugi [10] koriste sustavnu dinamiku (eng. *System Dynamics*) kao metodu za izradu simulacijskog modela za procjenu opskrbe gotovim betonom. U radu Labbana [11] obrađena je metoda diskretnih događaja za prikaz procesa asfaltiranja. Zankoul i Khoury [12] istražuju mogućnost kombinacije metode diskretnih događaja i metode koja se temelji na agentima (eng. *Agent Based Simulation*) za simulaciju izvođenja zemljanih radova.

Osnovni je cilj ovog istraživanja razviti model za procjenu produktivnosti procesa izvođenja betonskih radova, kroz analizu postojećeg stanja, s tim da se uzimaju u obzir dominantni faktori i razlozi zbog kojih se prilikom realizacije betonskih radova dolazi do odstupanja planiranih vrijednosti. Predložen je model za procjenu produktivnosti procesa betoniranja ploča na temelju podataka prikupljenih na različitim gradilištima objekata visokogradnje, s različitim izvođačima radova i različitim betonarama. U radu je prikazan model za procjenu produktivnosti betoniranja primjenom metoda višestruke linearne regresije. Tehnologije izvođenja betonskih radova koje su primijenjene u istraživanju podrazumijevaju pripremu betona u betonari, prijevoz betona automiješalicama do gradilišta, dopremu autopumpom do mjesta ugrađivanja te ugradnju betona perivibratorima.

2. Prikupljeni podaci

Istraživanje o produktivnosti procesa betoniranja praćenjem betonskih radova na gradilištima provedeno je na području grada Niša. Prikupljeni su podaci procesa betoniranja na osam gradilišta (četiri stambena objekta Po+P+VI, dva stambena objekta Po+P+5+Pk, jednog studentskog doma Po+P+11+Pk i jednog objekta zdravstvene zaštite Po+P+5+Pk). Sve su zgrade izgrađene prema skeletnom sustavu građenja. Tijekom 20 mjeseci izvršeno je 141 snimanje betoniranja ploča, međukatnih konstrukcija, greda, stupova i zidova. Ukupna ugrađena količina betona iznosila je 12,799 m³, a za to je bilo potrebno 648 radnih sati.

Podaci postupka betoniranja zabilježeni su metodom fotopregleda, i to zapisivanjem odgovarajućih podataka u specijalizirane obrasce. Na gradilištima su izmjereni sljedeći podaci: početak betoniranja, dolazak automiješalice, pozicioniranje automiješalice u položaj za istovar, početak istovara, pranje lijevka automiješalice poslije istovara, odlazak automiješalice, čekanje autopumpe ako nema betona na gradilištu, čekanje automiješalice u redu, razni opravdani i neopravdani zastoji (stanke za obrok, kvar mehanizacije, vremenske neprilike, zastoj organizacijske prirode, itd.), broj radnika na betoniranju, broj automiješalica u ciklusu, ukupan broj automiješalica, vrijeme između dolazaka automiješalica, količina ugrađenog betona, broj premještanja pumpe u drugi položaj i vrijeme potrebno za premještanje, čekanje pumpe na zadnju automiješalicu (dopuna).

S otpremnicama automiješalica zabilježne su sljedeće vrijednosti: broj otpremnice, vrsta i razred betona, količina betona po automiješalici, vrijeme polaska automiješalice iz betonare, udaljenost betonare od gradilišta.

Podaci prikupljeni iz tri betonare (na temelju razgovora s inženjerima zaposlenima u njima) su: karakteristike betonare (zapremina miješalice, trajanje ciklusa, način pripreme betona, način utovara automiješalice), karakteristike autobetonskih pumpi (teoretski učinak, duljina cijevi, broj sekcija, duljina crijeva, mogućnost povećanja dometa autopumpe nastavcima, broj nastavaka, duljina nastavaka, zapremina prijamnog silosa, godina proizvodnje). Za potrebe ovog istraživanja razmotren je uzorak koji čine betoniranja ploča (kontraploče i međukatne konstrukcije) kako bi se dobio reprezentativniji model zbog homogenosti podataka. Ovaj uzorak ima veličinu od 81 betoniranja (7 kontraploča i 74 međukatne konstrukcije); s količinom ugrađenog betona od 11.951 m³ (93 % od ukupne količine u cijelom uzorku), a bila su potrebna 503 radna sata. Statistička obrada podataka provedena je pomoću programa XLSTAT 2014 (programskog dodatka Excelu) kako bi se prikupili potrebni podaci i oblikovao model za procjenu produktivnosti. Nakon što su ispitane izuzetne vrijednosti (eng. *outlier*) pomoću Grubsovog testa, uzorak se sastojao od 78 elemenata. Za takav je uzorak određena opisna statistika na temelju koje je dobivena srednja vrijednost ostvarene produktivnosti 21,76 m³/h, sa standardnom devijacijom 6,36 m³/h. Prosječna ostvarena

Tablica 1. Prosječna količina betona, trajanje i ostvarena produktivnost na gradilištima – prosječne vrijednosti u jednom procesu betoniranja

Oznaka gradilišta	Broj betoniranja	Kat	Količina betona po betoniranju [m ³]	Trajanje betoniranja [min]	Ostvarena produktivnost P _{ostv} [m ³ /h]
1	10	Temelj-VI	102,37	336	19,59
2	3	V-VII	182,67	608	18,49
3	9	Po- VI	66,11	228	18,46
4	5	II-VI	89,80	308	18,02
5	8	Po-VI	71,13	216	21,36
6	4	III-Pk	65,66	341	11,72
7	8	Po-Pk	69,75	213	20,50
8	34	Temelj-V	197,82	453	26,06

produktivnost na svakom od osam gradilišta (dobivena kao srednja vrijednost svih produktivnosti u odnosu na broj betoniranja na zadanom gradilištu, osim izuzetnih vrijednosti) prikazana je u tablici 1.

Prosječne vrijednosti tih zastoja u radu dobivene su mjerenjem vremena čekanja autopumpe na dopremanje betona, kao i čekanje automiješalice u redu za istovar betona. S obzirom na ocjenu prema kojoj izvođač mora naknadno platiti čekanje autopumpe i/ili automiješalice po satu (podaci prikupljeni iz betonara), podaci su pokazali da autopumpa čeka na beton u prosjeku 37.8 minuta ili 15 posto ukupnog vremena betoniranja, što znači da su troškovi čekanja približno 1,5 €/m³ ugrađenog betona.

Sve automiješalice koje sudjeluju u jednom betoniranju provedu u prosjeku 161 minutu ili 62,5 posto ukupnog vremena betoniranja čekajući na gradilištu, što stvara dodatne troškove koji iznose približno 1 €/m³ ugrađenog betona. Automiješalica čeka na istovar betona na gradilištu u prosjeku 13 minuta. Za veće količine radova ti troškovi zastoja mogu biti značajna stavka u ukupnim troškovima betoniranja.

3. Utjecajni faktori

Proučavanje produktivnosti podrazumijeva analizu svih faktora koji imaju pozitivan i/ili negativan utjecaj. Postoji velik broj utjecajnih faktora, ali važno je uočiti i izdvojiti one najznačajnije. Također, važno je razmotriti i one faktore koji su imali negativno djelovanje na ostvarenje produktivnosti rada, pa ih eliminirati, kontrolirati ili otkriti mogućnosti preusmjerenja njihovog djelovanja u pozitivnom smjeru utjecaja. Faktore koji su imali pozitivan utjecaj na produktivnost treba istaknuti i iskoristiti. Kada su poznati svi faktori koji utječu na produktivnost, mogu se točnije procijeniti rokovi i troškovi projekta.

3.1. Prijedlog ulaznih parametara za regresijsku analizu

Pripremljen je popis od 37 nezavisnih varijabli koje bi mogle imati utjecaj na produktivnost procesa betoniranja, na temelju pažljivo proučene literature i višegodišnjeg iskustva u praksi, a potom je metodom eliminacije izabrano 14 varijabli.

Predložene varijable su odabrane zbog činjenice da je temeljem dugogodišnjeg praćenja radova na gradilištu zaključeno da pri izvođenju betonskih radova te varijable imaju značajan utjecaj. Nezavisne varijable su razvrstane u dvije grupe: kvantitativne i kvalitativne, na temelju njihovih karakteristika i jedinica kojima su izražene. Kvantitativne varijable (grupa B1) diskretne su ili kontinuirane promjenjive veličine koje su mjerljive, a kvalitativne su varijable (grupa B2) opisane.

Na temelju prikupljenih podataka i iskustva stečenog na gradilištu predložene su sljedeće varijable (zavisne i nezavisne promjenjive) za regresijsku analizu:

A - zavisne varijable:

- Produktivnost procesa betoniranja - P (m³/h)**
Predstavlja količinu ugrađenog betona tijekom jednog radnog sata; računa se kao kvocijent ukupne količine ugrađenog betona i ukupnog potrebnog vremena. Ukupno potrebno vrijeme uključuje vrijeme efektivnog rada te sva čekanja i zastoje.
- Trajanje betoniranja - T(h)**
Predstavlja vrijeme potrebno za ugrađivanje potrebne količine betona, mjereno od početka do završetka betoniranja. Za početak betoniranja uzeto je vrijeme početka istovara prve automiješalice, a za završetak betoniranja vrijeme završetka obrade gornje površine ploče.

B1 - nezavisne kvantitativne varijable:

- Količina betona - Q (m³)**
To se odnosi na količinu koja je zadana predmjerom radova. Često se događa da izračunana vrijednost u predmjeri radova nije ili ne može biti precizna zbog čega se naručuje približna količina betona, a onda na kraju dopuna na osnovi procjene ili računanjem preostale potrebne količine. Zbog toga se javlja čekanje zadnje automiješalice i produženja trajanja radova.
- Broj automiješalice u ciklusu - B_{mc} (komada/ciklus)**
Budući da je proces cikličan, ista vozila dolaze na gradilište određen broj puta (ciklusa). Broj vozila u jednom ciklusu ovisi o učinku baze, udaljenosti do gradilišta, kapaciteta automiješalice. Treba odrediti optimalan broj vozila tako da uvijek ima dovoljnih količina betona na gradilištu, ali i da se čekanje automiješalice svede na minimum.

3. Prosječna količina betona po automiješalici - $Q_{pr,m}$ ($m^3/$ automiješalici)
Zbog različitih kapaciteta automiješalica, prosječna količina betona po automiješalici predstavlja kvocijent između ukupne količine i ukupnog broja automiješalica.
4. Broj radnika - B_c (komada)
Broj radnika angažiranih na betoniranju. Kod betoniranja pumpom uobičajeno je da se radna skupina sastoji od 7 do 9 radnika. Dva radnika drže i usmjeravaju crijevo pumpe, jedan do dva radnika izvode ugrađivanje pervibratorom (ovisno o broju pervibratora), dva do tri radnika rade na razastiranju betona i jedan do dva na ravnanju i obradi gornje površine ploče. U posebnim uvjetima kada je domet pumpe nedovoljan, pa je crijevo oslonjeno na oslonce, skele ili se pomoću posuda ugrađuje na poziciju, može biti potreban i veći broj radnika.
5. Teoretski učinak pumpe - U_{tp} (m^3/h)
Zbog sudjelovanja nekoliko različitih vrsta autopumpi, potrebno je uvesti i taj faktor. Predloženo je teoretski učinak kojim će se iskazati sposobnost pumpe.
Starost pumpe - SP (godina)
Predstavlja broj godina od proizvodnje pumpe do trenutka upotrebe. Povećanjem starosti mehanizacije, povećava se istrošenost i dotrajalo dijelova, pa je mehanizacija podložnija kvarovima, a stoga je manji učinak.
6. Domet autopumpe - DP (m)
Dometom autopumpe je iskazana dužina strijele (4 ili 5 sekcija) zajedno s gumenim crijevom na kraju. Povećanje dometa je moguće dodavanjem nastavaka koji su isti kao crijevo na kraju dužine 4 do 5 m.
7. Premještanje autopumpe - PP (broj)
Ovisno o dometu autopumpe, dimenziji objekta, visini na kojoj se izvodi betoniranje, pristupačnosti za prilaz pumpe do objekta, nekada je potrebno tijekom betoniranja postavljati autopumpu u više položaja. Broj premještanja je označen nulom ako se betoniranje obavlja iz samo jednog (početnog) položaja autopumpe, ili je označeno brojem 1 ako postoji jedno premještanje pumpe (dva položaja) ili brojem 2 ako se autopumpa premješta dva puta (ima tri položaja).
8. Visina na kojoj se izvodi betoniranje - V (m)
Predstavlja visinu objekta u trenutku betoniranja ploče; a vrijednosti su preuzete iz projekata.
9. Debljina ploče - dp (m)
Kod ploča je zadana njihova debljina, a kod ploča koje sadrže i grede s većom visinom zadana je prosječna debljina određena na temelju postotnog površinskog udjela.
10. Udaljenost betonare od gradilišta - L_{b-g} (km)
Udaljenost od betonare do gradilišta izraženo je u kilometrima.
11. Učinak betonare - $U_{pr,b}$ (m^3/h)
Na temelju trajanja ciklusa i zapremine miješalica izračunani su praktični učinci betonare.

B2 - nezavisne kvalitativne varijable:12. Vrste ploče - TP

U razmatranom uzorku javljaju se pune AB ploče, AB ploče zajedno s gredama i "fert" međukatne konstrukcije. Podijeljene su u dvije grupe: prvu grupu čine samo ploče označene oznakom TP-P i drugu grupu čine ploče koje sadrže grede i "fert" međukatne konstrukcije u oznaci TP-PG.

13. Raspoloživost betonare - RasB

Ako betonara u isto vrijeme ispoučuje beton za veći broj gradilišta ili priprema beton za svoje potrebe (npr. proizvodnja montažnih elemenata i dr.), to može dovesti do čekanja na isporuku betona. Prema redosljedu otpremnica može se zaključiti isporučuje li se beton samo na promatranom gradilištu - u tom je slučaju oznaka 0, ili se isporučuje i na drugim gradilištima - u tom je slučaju oznaka 1.

4. Regresijska analiza

Odnosi među pojavama mogu biti deterministički (funkcionalni, egzaktni) i stohastički (statistički). Dok je kod determinističkih odnosa izlaz točno određen funkcijom ulaznih podataka (jednoj vrijednosti nezavisne promjenjive varijable odgovara samo jedna točno određena vrijednost zavisne promjenjive varijable), kod stohastičkih odnosa postoji određena slučajnost (jednoj vrijednosti nezavisne promjenjive varijable odgovara niz mogućih vrijednosti zavisne promjenjive varijable). U praksi je znatno veći broj pojava u kojima vladaju stohastički odnosi. Jedna od metoda koju je moguće primijeniti za analizu podataka stohastičkih procesa je višestruka (multipla) regresija. Ta je metoda pogodna u slučajevima kada treba rješavati problem gdje postoji jedna zavisna i više nezavisnih promjenjivih varijabli. Ako je veza između podataka linearna, slučaj se svodi na višestruki linearni model. Osnovni oblik višestrukog linearnog regresijskog modela prikazan je izrazom (1):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p + \varepsilon_i \quad (1)$$

gdje je:

Y - zavisna promjenjiva varijabla

ε_i - slučajna pogreška

X_1, X_2, \dots, X_p - nezavisne promjenjive varijable

b_0, b_1, \dots, b_p - regresijski koeficijenti.

Zadatak regresijske analize je određivanje oblika veze (ovisnosti) između promatranih pojava, a to se postiže oblikovanjem odgovarajućeg regresijskog modela [18]. Poslije izrade modela treba ocijeniti njegovu kvalitetu i reprezentativnost u opisivanju ovisnosti između promatranih pojava. Zato se koristi analiza varijacije (eng. *Analysis of Variance* - ANOVA) kojom se, kao značajnom alatu za analizu kvalitete modela, računaju mjere reprezentativnosti kao što su: koeficijent

korelacije (eng. *multiple R*), koeficijent determinacije - R^2 (eng. *R Square*), standardna devijacija regresije (eng. *Standard Error*), F-test (eng. *F ratio*).

5. Izrada regresijskog modela

Produktivnost i vrijeme obrnuto su proporcionalne varijable, pa ako je poznata vrijednost jedne varijable, moguće je jednostavno izračunati drugu varijablu. U ovom radu predložena je izrada regresijskog modela koji služi za procjenu produktivnosti, na temelju koje se jednostavno može izračunati trajanje radova i modela koji će direktno poslužiti za procjenu trajanja betoniranja. Usporednom analizom oba modela navedene su prednosti i nedostatci svakog od njih, a potom je bolji model predložen za primjenu.

Pretpostavljen je linearni odnos između svih nezavisnih varijabli te između nezavisnih i zavisnih varijabli. Jedna od pretpostavki za upotrebu regresijske analize jest postojanje linearne ovisnosti između varijabli. Ona je nužna jer analiza započinje računanjem koeficijenata jednostavne korelacije (bivarijantnih korelacija) za sve parove varijabli, a svi ti izračuni zahtijevaju linearan odnos između parova varijabli. Broj podataka u uzorku je $N = 78$, dok je broj nezavisnih varijabli koje se u početnoj fazi razmatraju 14, što drugim riječima znači da je ispunjen uvjet o potrebnom

broju podataka. Broj podataka u uzorku mora biti najmanje tri puta veći od broja promjenjivih (u suprotnom bi regresijski koeficijenti bili nepouzdaniji) [19]. U daljnjem radu je provedena je korelacijska analiza i izrađeni regresijski modeli za procjenu produktivnosti (model P) i procjenu trajanja betoniranja (model T) s istim ulaznim varijablama.

5.1. Model za procjenu produktivnosti betoniranja

Za oblikovanje modela za procjenu produktivnosti (model P) primijenjena je tzv. *backward* metoda (korak po korak unatrag). Ta metoda podrazumijeva uvođenje svih varijabli odjednom u regresijsku analizu u prvom koraku, a nakon toga postupnu eliminaciju varijabli koje ne zadovoljavaju određene uvjete sve dokle je moguće poboljšanje modela. Postoji nekoliko kriterija za ispitivanje zadovoljavanja uvjeta od kojih je jedan i t - test koji je primijenjen u ovom radu. Ako je apsolutna vrijednost parametra t (t statistika Studentovog rasporeda) manja od kritične vrijednosti t_{kr} koja se može očitati iz odgovarajućih tablica, i vrijednost $P_r > 0,05$, za interval pouzdanosti 95 posto, varijabla se eliminira iz daljnje analize.

Nakon analize varijacije (ANOVA) može se zaključiti da ne postoji problem multikolinearnosti (tablica 2.) na osnovu faktora povećanja varijacije - VIF (eng. *Variance Inflation Factor*). Ako je

Tablica 2. Faktor povećanja varijacije - VIF

Statističke varijable	Q	dp	V	Br	Bmc	Qpr,m	Ut,p	SP	DP	PP	Upr,b	Lb-g	RasB	TP-P	TP-PG
Tolerancija	0,31	0,430	0,467	0,878	0,694	0,675	0,122	0,438	0,160	0,619	0,413	0,482	0,867	0,608	0,608
VIF	3,112	2,326	2,139	1,138	1,442	1,482	8,205	2,285	6,265	1,615	2,423	2,074	1,154	1,644	1,644

Tablica 3. Parametri modela P (prvi korak)

Izvor	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t	Donja granica (95 %)	Gornja granica (95 %)
Intercept	21,684	6,643	3,264	0,002	8,421	34,946
Q	0,026	0,005	4,840	<0,0001	0,015	0,036
dp	-19,106	3,084	-6,195	<0,0001	-25,264	-12,949
V	-0,122	0,041	-2,983	0,004	-0,203	-0,040
Br	0,000	0,000				
Bmc	1,404	0,337	4,172	<0,0001	0,732	2,076
Qpr,m	1,763	0,583	3,026	0,004	0,600	2,926
Ut,p	-0,038	0,022	-1,704	0,093	-0,082	0,006
SP	-0,719	0,152	-4,727	<0,0001	-1,023	-0,415
DP	0,000	0,000				
PP	-3,071	0,621	-4,942	<0,0001	-4,311	-1,830
Upr,b	0,000	0,000				
Lb-g	-0,422	0,051	-8,340	<0,0001	-0,524	-0,321
RasB	-4,511	0,707	-6,376	<0,0001	-5,923	-3,098
TP-P	4,854	0,736	6,591	<0,0001	3,384	6,324
TP-PG	0,000	0,000				

Tablica 4. Parametri modela P (konačan model)

Izvor	Vrijednost	Standardna pogreška	t	Pr > t	Donja granica (95%)	Gornja granica (95%)
Intercept	14,533	5,233	2,783	0,007	4,109	24,957
dp	-17,307	2,939	-5,890	<0,0001	-23,172	-11,441
V	-0,118	0,041	-2,855	0,006	-0,201	-0,036
Bmc	1,255	0,330	3,808	0,000	0,597	1,913
Qpr,m	1,764	0,591	2,985	0,004	0,584	2,943
SP	-0,548	0,116	-4,729	<0,0001	-0,779	-0,317
PP	-2,998	0,629	-4,769	<0,0001	-4,253	-1,743
Lb-g	-0,432	0,051	-8,451	<0,0001	-0,534	-0,330
RasB	-4,453	0,717	-6,213	<0,0001	-5,883	-3,022
Q	0,026	0,005	4,957	<0,0001	0,016	0,037
TP-P	4,675	0,739	6,324	<0,0001	3,199	6,150

VIF > 10, tada se pojavljuje multikolinearnost [19]. Kako je u tablici za sve varijable VIF < 10, analiza je nastavljena. Poslije prvog koraka *backward* regresijom su određeni parametri modela za procjenu produktivnosti (tablica 3.). Na osnovi P_r vrijednosti i parametra t, može se zaključiti da pojedine varijable nisu statistički značajne (ako je $P_r > 0,05$ i $|t| < t_{kr}$) i treba ih eliminirati iz daljnjeg razmatranja. Za uzorak veličine: N = 78, broj varijabli: p = 14 i broj stupnjeva slobode (eng. *Degrees of freedom*), DF = N-p-1 = 63, iz tablica Studentovog rasporeda, $t_{kr} = 2,00$ [20].

Varijable koje nisu statistički značajne obojane su u tablici 3. i to su: broj radnika, domet autopumpe, praktični učinak baze i vrsta ploče TP - PG, dok teoretski učinak pumpe nije značajan jer je vrijednost $|t| = 1,704 < t_{kr}$.

Pretpostavlja se da varijabla broj radnika nema utjecaja zato što je radna grupa bila sastavljena od dovoljnog broja osposobljenih radnika za taj proces, pa su na taj način eliminirani zastoji i smanjenje produktivnosti. Varijabla domet pumpe nije statistički značajna zbog činjenice što domet pumpe na pojedinim dijelovima ploče nije bio dovoljan, pa se pumpa morala premješati ili su umetnuti nastavci pomoću gumenih crijeva što nije značajno utjecalo na produktivnost. Praktični učinak baze i tip ploče nisu imali utjecaj na promjenu produktivnosti. Nakon eliminiranja spomenutih varijabli, proveden je drugi korak analize, te je određen konačni oblik regresijskog modela za procjenu produktivnosti betoniranja ploča. U tablici 4. prikazani su regresijski koeficijenti, a matematički oblik modela prikazan je pomoću izraza (2). Sve varijable u tablici su statistički značajne: $P_r < 0,05$.

Konačan model ima 10 nezavisnih promjenjivih varijabli, a prikazan je pomoću izraza (2):

$$P_{prog} = 14,533 - 17,307dp - 0,118V + 1,255B_{mc} + 1,764Q_{pr,m} - 0,548SP - 2,998PP - 0,132L_{b-g} - 4,453RasB + 0,026Q + 4,675TP - P [m^3/h] \quad (2)$$

gdje izraz P_{prog} označava prognoziranu produktivnost (m^3/h).

Promjenjive varijable koje imaju pozitivne regresijske koeficijente utječu na povećanje produktivnosti, a to su: broj automiješalica u ciklusu, prosječna količina betona po automiješalici, količina betona i vrsta ploče - P. Veći broj automiješalica u ciklusu utječe na bolju opskrbljenost gradilišta betonom (nema čekanja ili je smanjeno vrijeme čekanja autopumpe), pa je ugrađena veća količina betona. Isto tako, veće količine betona po automiješalici utječu na manje gubitke vremena potrebnog za pozicioniranje automiješalice u položaj za istovar, kao i pranje lijevka nakon istovara. Ugrađivanje betona u ploče jednake debljine (vrsta ploče - P) zahtijeva manje vremena u odnosu na ploče s rebrima i gredama, koje imaju složenije i teže pristupačne presjeke, pa je produktivnost veća. Takvi su i očekivani rezultati, međutim pokazalo se da povećanje količine za ugrađivanje povećava i produktivnost: svakih 10 m^3 betona utječe na povećanje produktivnosti za 0,26 m^3/h .

Ostale promjenjive varijable imaju negativan utjecaj, tj. utječu na smanjenje produktivnosti. Logično je da se povećanjem visine na kojoj se izvodi ugrađivanje betona smanjuje produktivnost, kao i da starost autopumpe, njeno premještanje i ako betonara istovremeno isporučuje beton za druga gradilišta dolazi do zastoja i smanjenja produktivnosti.

Na osnovi dobivenog modela (2) može se zaključiti da veći utjecaj na promjenu produktivnosti imaju varijable: debljina ploče, premještanje autopumpe, raspoloživost betonare i vrsta ploče. Ako sve ostale varijable imaju konstantne vrijednosti, a debljina ploče se poveća za 10 cm, produktivnost se smanjuje za 1,73 m^3/h . Ovo nije očekivani utjecaj, s obzirom na to da bi ugrađivanje betona u elemente s većom količinom betona po jedinici mjere (m^3) trebalo imati kraće trajanje i veću produktivnost. Međutim, na tu pojavu moglo je utjecati to što ploče većih debljina (većih od 20 cm) nisu betonirane u slojevima po 15 cm, kako je predviđeno normativima, pa je bilo potrebno i duže vrijeme za punjenje i vibriranje. Svako premještanje autopumpe smanjuje produktivnost za približno 3 m^3/h , odnosno, ako se izvodi betoniranje AB pune ploče

bez greda, produktivnost je veća za približno 4,7 m³/h, a ako betonara u isto vrijeme opskrbljuje i druga gradilišta, produktivnost se smanjuje za 4,5 m³/h, itd.

Kvaliteta tog modela se može ispitati pomoću koeficijenta determinacije R² koji iznosi 0,857 (tablica 5.), što znači da je 85,7 posto varijabilnosti zavisne promjenjive varijable P objašnjeno s predloženih deset nezavisnih promjenjivih varijabli. Taj koeficijent ima prilično visoku vrijednost, što pokazuje na zadovoljavajuću kvalitetu modela. Veći koeficijent determinacije označava veće značenje modela u objašnjavanju regresijske funkcije i preciznije predviđanje zavisne promjenjive varijable. U istoj tablici, vrijednost statistike Durbin-Watson, DW = 1,733 potvrđuje ispunjen uvjet o nepostojanju autokorelacije. Vrijednost statistike DW je u granicama od 0 do 4. Ako je ta vrijednost 2 ili manja, to znači da ne postoji linearna veza između bilo koja dva člana ϵ_i i ϵ_j [19].

Tablica 5. Ocjena kvalitete modela P

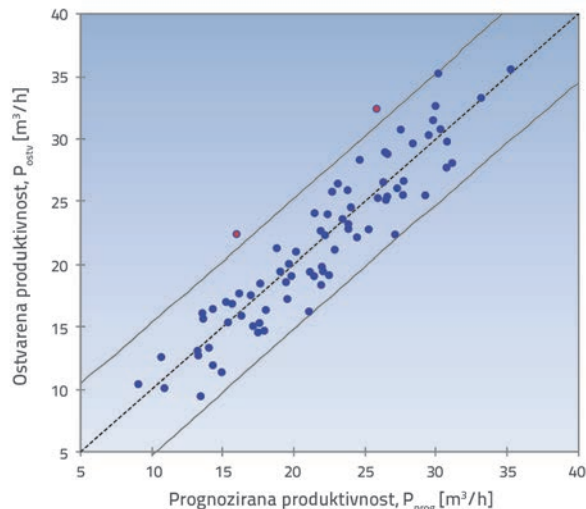
Zapažanja	78,000
Zbroj težina	78,000
DF	67,000
R ²	0,857
Prilagođeni R ²	0,836
MSE	6,706
RMSE	2,590
DW	1,733

Da bi primjena regresijske jednadžbe bila opravdana prilikom procjene, treba utvrditi jesu li objašnjavajuće promjenjive varijable značajne za ponašanje zavisne promjenjive varijable. Za to se ispitivanje koristi F-test: ako je $F > F_{kr}$, koeficijenti su različiti od nule, odbacuje se nulta hipoteza i prihvaća alternativna hipoteza. Iz tablice za F-test, na razini pouzdanosti od 99 posto, $F_{kr(0,01)} = 2,35$ [20] i budući da je $F = 40,313$ (tablica 6.) veće od F_{kr} , može se zaključiti da je opravdana primjena predloženog modela za procjenu produktivnosti.

Na dijagramu (slika 1.) prikazano je slaganje ostvarenih vrijednosti produktivnosti i procijenjenih vrijednosti na temelju predloženog modela. Dijagram raspršenosti pokazuje da se većina točki nalazi oko pravca nagiba 1:1 (eng. *Fitted line*) u okviru intervala povjerenja od 95 posto. Može se uočiti da su samo tri točke izvan ili na granici, što čini samo 3,8 posto od ukupnog broja točki.

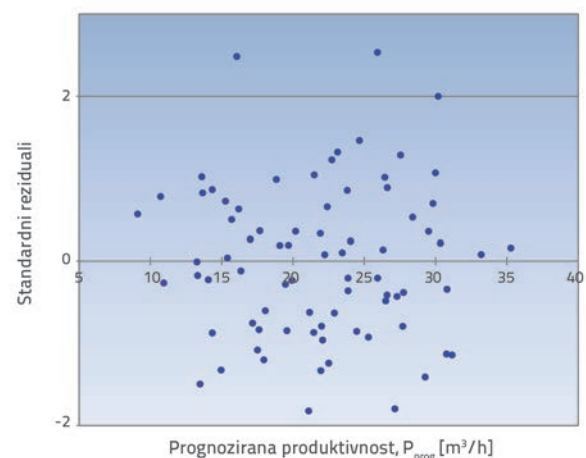
Tablica 6. Ocjena značajnosti modela P

Izvor	DF	Zbroj kvadrata	Srednji kvadrat	F	Pr > F
Model	10	2703,562	270,356	40,313	<0,0001
Pogreška	67	449,333	6,706		
Ispravljeno ukupno	77	3152,896			



Slika 1. Raspodjela ostvarene i procijenjene produktivnosti betoniranja

Ako je točna pretpostavka da je varijacija konstantna, tada reziduali imaju normalnu raspodjelu. Za predloženi model standardizirani reziduali prognozirane produktivnosti oblikuju slučajan raspored, što potvrđuje dijagram na slici 2.



Slika 2. Standardizirani reziduali modela P

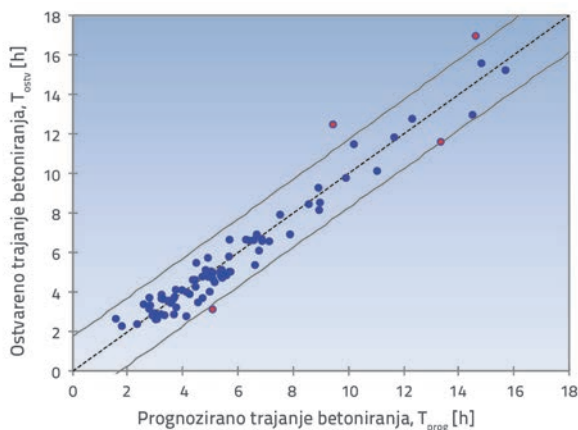
5.2. Model za prognožiranje trajanja betoniranja

Na isti način kao i za model za prognožiranje produktivnosti (model P), provedena je analiza i izrađen model za procjenu trajanja betoniranja ploča (model T). Backwardovom regresijom poslije tri koraka, dobiven je model prikazan izrazom (3):

$$T_{prog} = -0,301 + 6,02dp + 0,029V - 0,013B_{mc} + 0,153SP + 0,888PP - 0,021U_{prb} + 0,068L_{b-g} + 1,322RasB + 0,032Q - 1,145TP - P [h] \quad (3)$$

gdje T_{prog} označava procijenjeno vrijeme betoniranja (h).

Koeficijent determinacije R^2 iznosi 0,943, što znači da je 94,3 posto varijabilnosti zavisne promjenjive varijable T objašnjeno s predloženih deset nezavisnih promjenjivih varijabli. Statistika F-testa ($F = 111,266$) pokazuje opravdanost primjene predloženog modela za procjenu trajanja betoniranja. Na slici 3. prikazano je slaganje ostvarenog i procijenjenog trajanja betoniranja na osnovi predloženog modela.



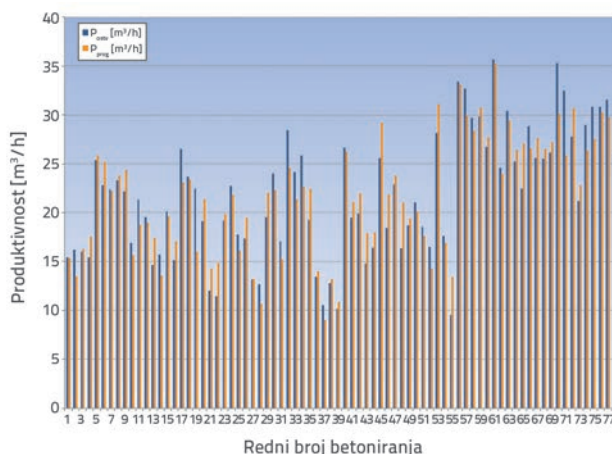
Slika 3. Raspodjela ostvarenog i procijenjenog trajanja betoniranja

6. Rasprava o predloženim modelima

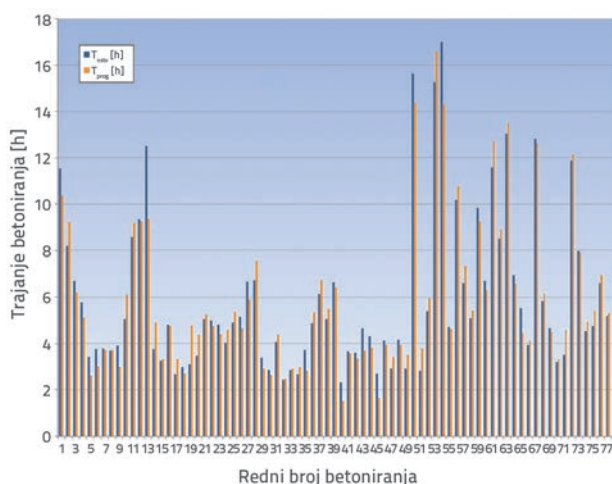
Predloženi modeli imaju isti broj statistički značajnih nezavisnih promjenjivih varijabli s gotovo istom kombinacijom. Razlika se odnosi samo na varijable: prosječna količina betona po automiješalici koja se pojavljuje kod modela za procjenu produktivnosti, ali ne i kod modela za procjenu trajanja betoniranja. Varijabla praktični učinak betonare se pojavljuje kod modela T, a ne pojavljuje kod modela P. Koeficijenti determinacije R^2 imaju dosta visoke vrijednosti što pokazuje na kvalitetu modela. S obzirom na to da je nešto veća vrijednost tog koeficijenta kod modela T, što se vidi i na dijagramu na slici 3, može se govoriti o pouzdanijoj procjeni tog modela u odnosu na prethodni model. Naime, točke na dijagramu raspršenosti su raspoređene bliže regresijskoj liniji, kao i na temelju statistike F-testa, gdje je vrijednost F veća kod modela T u odnosu na model P. Oba su modela ocijenjena na temelju srednje apsolutne pogreške između ostvarenih i procijenjenih vrijednosti MAPE (eng. *Mean Absolute Percentage Error*).

Za model P vrijednost je MAPE iznosila 9,69 posto, a za model T je iznosila 11,20 posto. Iako je koeficijent determinacije za model T veći, javlja se veći postotak srednje apsolutne pogreške. Slika 4. pokazuje usporedbu ostvarenih produktivnosti (plava boja) i procijenjenih produktivnosti (narančasta boja), a slika 5.

na sličan način usporedbu ostvarenih i procijenjenih trajanja betoniranja.



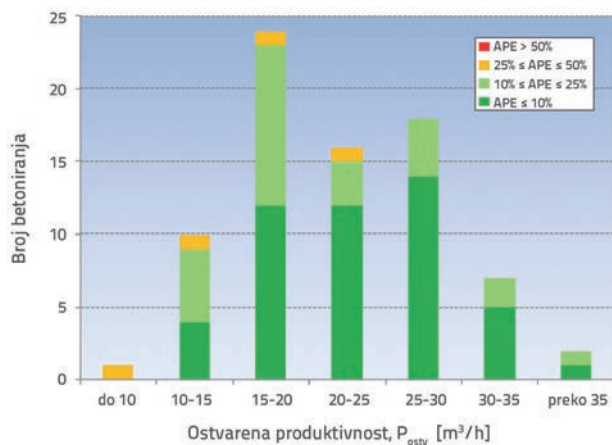
Slika 4. Ostvarena i procijenjena produktivnost betoniranja



Slika 5. Ostvareno i procijenjeno trajanje betoniranja

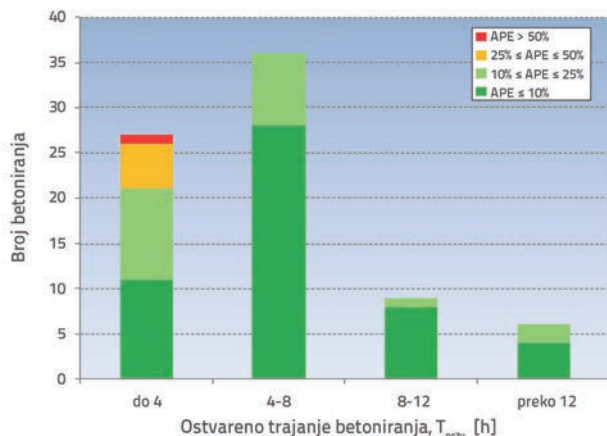
Zbog daljnje analize dobivenih modela, rezultati su raspoređeni (slika 6.) na temelju apsolutne postotne pogreške - APE (eng. *Absolute Percentage Error*) i klasifikacije betoniranja prema ostvarenoj produktivnosti. Snimljeni procesi betoniranja podijeljeni su u sedam grupa prema ostvarenoj produktivnosti i to: procesi s ostvarenom produktivnošću do 10, 10-15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-35 i više od 35 m³/h. Apsolutne pogreške su podijeljene u četiri grupe: do 10; 10-25; 25-50 i više od 50 posto.

Istraživanje je pokazalo da 62 posto rezultata ima apsolutnu pogrešku pri procjeni produktivnosti manju od 10 posto, odnosno 95 posto svih rezultata je procijenjeno s pogreškom do 25 posto. Veća odstupanja javila su se u samo 5 posto rezultata i to s pogreškom do 50 posto. Pogreške između ostvarene i procijenjene produktivnosti veće od 50 posto nisu zabilježene. Na temelju tih rezultata može se zaključiti da model P ima pouzdaniju procjenu produktivnosti čije su vrijednosti veće od 20 m³/h, jer je APE uglavnom u rasponu do 10 posto.



Slika 6. Histogram ostvarene produktivnosti prema APE

Za model T su također raspoređeni rezultati (slika 7.) na temelju apsolutne postotne pogreške - APE (eng. *Absolute Percentage Error*) i klasifikacije betoniranja prema ostvarenom trajanju. Snimljeni procesi betoniranja podijeljeni su u četiri grupe prema ostvarenom trajanju i to: procesi s trajanjem do 4; 4-8; 8-12 i s trajanjem dužim od 12 sati. Apsolutne pogreške su podijeljene u četiri grupe: do 10; 10-25; 25-50 i više od 50 posto.

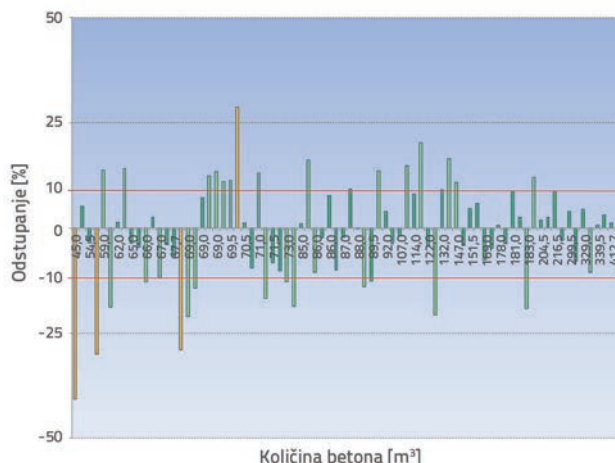


Slika 7. Histogram ostvarenog trajanja prema APE

Na osnovi prikazane podjele, za model T, može se zaključiti da je 93 posto rezultata procijenjeno s pogreškom do 25 posto (65 posto s pogreškom do 10 posto, i 27 posto s pogreškom 10-25 posto), a samo 6 posto rezultata ima pogrešku veću od 25 posto i jedan rezultat ima pogrešku od 53 posto. Model T daje bolje rezultate za betoniranja koja traju dulje od 4 sata. Sve pogreške veće od 25 posto pojavile su se u slučaju kada je trajanje betoniranja kraće od 4 sata.

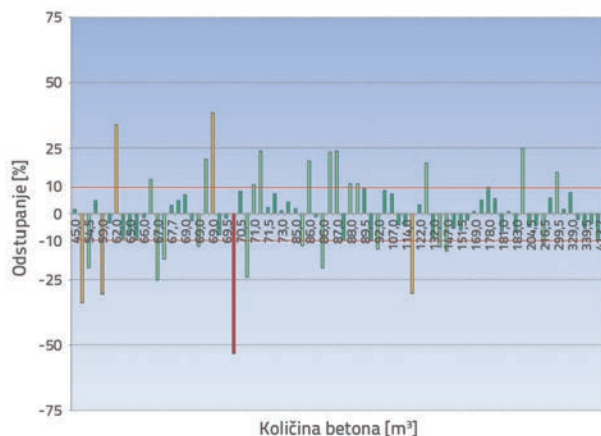
Provedena je analiza kvalitete modela u odnosu na količine betona. U tom cilju radi lakšeg razmatranja količina betona za koje je procijenjena ili podcijenjena produktivnost (trajanje) izračunana je postotna pogreška PE (eng. *Percentage Error*). Na slikama 8. i 9. prikazano je postotno odstupanje ostvarenih i procijenjenih produktivnosti, odnosno trajanja betoniranja raspoređenih prema količinama betona u ulaznom nizu.

Slučajevi kod kojih se javilo veće odstupanje ostvarene produktivnosti u odnosu na procijenjenu (žuta boja na dijagramu) uglavnom su s određenim zastojevima koji nisu uzeti u obzir pri oblikovanju modela. Zabilježen je proces sporog betoniranja zbog nedovršene oplata, armature ili lošeg betona. U tim slučajevima prognozirana produktivnost je naravno veća od ostvarene, PE ima negativne vrijednosti na dijagramu (slika 8.). Produktivnost s pozitivnim PE = +28,79 posto se javila u slučaju betoniranja po snijegu. Budući da vremenski uvjeti nisu uzeti u obzir u regresijskoj analizi, ovdje je utjecaj snijega očito imao pozitivan utjecaj na produktivnost, rad je bio brži kako bi se prije završio cijeli proces. Na slici 8, također se može vidjeti da se javljaju manja odstupanja između ostvarenih i procijenjenih produktivnosti za veće količine betona, prije svega za količine čije vrijednosti prelaze 100 m³.



Slika 8. Pogreška kod modela P

Kod prognožiranja trajanja, za razliku od prognožiranja produktivnosti, slučajevi s većom pogreškom su uglavnom oni gdje je procijenjeno trajanje veće u odnosu na ostvareno, tj. uslijed bolje organizacije i bez nepotrebnih zastoja, betoniranje je završeno u kraćem vremenu. U tim slučajevima gdje je procijenjeno trajanje veće od ostvarenog, PE ima negativne vrijednosti na dijagramu (slika 9.). Najveće odstupanje, PE = -53,04 % pojavljuje se za isti slučaj betoniranja po snijegu.



Slika 9. Pogreška kod modela T

Kao i kod procjene produktivnosti, i kod procjene trajanja (slika 9.) manja su odstupanja između ostvarenih i procijenjenih vrijednosti za veće količine betona, osobito za količine čije vrijednosti prelaze 100 m³. Taj je model bolji u procjeni trajanja za veće količine betona (više od 100 m³).

Za veće količine betona (više od 200 m³) ostvarene su veće produktivnosti betoniranja. To se može objasniti činjenicom da je za veće količine radova, budući da je potrebno i duže vrijeme, radi se ozbiljnije, betonara priprema beton samo za određeno gradilište, stoga je i smanjeno vrijeme čekanja betona. Zbog dužeg očekivanog vremena, rad je brži, bez zastoja i radi bržeg završetka, produktivnost je veća. Također, veća produktivnost se može postići zbog činjenice da se tijekom dužeg trajanja betoniranja mogu nadoknaditi neka manja, pojedinačna kašnjenja i druga ometanja, koja bi se mogla pojaviti tijekom dužeg radnog procesa.

Predloženi modeli za procjenu produktivnosti procesa betoniranja (model P) i procjenu trajanja betoniranja (model T) mogu biti korisni alati u fazi planiranja radova. Primjenom tih modela omogućena je pouzdanija procjena trajanja aktivnosti pri izvođenju betonskih radova čime se osigurava učinkovitije upravljanje betoniranjem.

7. Zaključak

U radu su prikazani i argumentirani predloženi regresijski modeli za procjenu produktivnosti i trajanja betoniranja armiranobetonskih ploča pomoću autopumpi za beton. Predložena su dva modela primjenom višestruke linearne regresije, i to model P za procjenu produktivnosti betoniranja ploča i model T za procjenu trajanja betoniranja ploča. S obzirom na kriterije koji su ispitani kako bi se odredila kvaliteta spomenutih modela, oba modela su ocijenjena kao zadovoljavajuća za primjenu. Može se zaključiti to da model T ima blagu prednost

u odnosu na model P, jer ima veći koeficijent determinacije, R² i F statistikom je reprezentativniji. S druge strane, ako se uzme u obzir srednja apsolutna pogreška (MAPE), bolji je model P. Oba modela imaju vrlo sličnu kombinaciju značajnih varijabli i isti njihov broj. Model P se pokazao pouzdanijim za produktivnosti veće od 20 m³/h, odnosno model T za trajanja dulja od 4 sata. U odnosu na količine betona, bolja pouzdanost procjene (manja odstupanja) modela P je zabilježena za količine betona veće od 100 m³, ali za veće količine procijenjene vrijednosti su uglavnom podcijenjene. Model T, s obzirom na količinu betona, također daje bolje rezultate za količine veće od 100 m³, a za veće količine uglavnom procjenjuje duža trajanja od ostvarenih. To se može objasniti time da veća količina zahtijeva i duže vrijeme, pa je organizacija procesa bolja i manje je zastoja i nepotrebnih gubitaka.

Predloženi modeli mogu biti korisni u fazi planiranja i omogućiti točniju procjenu trajanja aktivnosti pri izvođenju betonskih radova. Procjenom produktivnosti i trajanja betoniranja utječe se na donošenje odluka, procjenu tijeka radova i bolje upravljanje procesom betoniranja s ciljem povećanja produktivnosti, skraćivanja trajanja i smanjenja troškova.

Preporuke za daljnja istraživanja mogu biti vezana za povećanje uzoraka uključivanjem većeg broja gradilišta, kao i proširenje baze podataka rezultatima mjerenja na gradilištima u više gradova s obzirom na to da neke karakteristike izvođača radova i proizvođača betona koji se pojavljuju na određenom području mogu imati određeni utjecaj na rezultate. Istovremeno snimanje procesa u betonari i na gradilištu omogućilo bi realniji pristup cjelokupnom procesu. Uključivanje novih varijabli, analiza i ispitivanje njihovog utjecaja, također bi moglo pridonijeti izradi modela s boljom preciznošću za prognoziranje produktivnosti. Osim toga, istraživanje se može proširiti na neke druge tehnologije betoniranja, kao što je na primjer prijenos betona dizalicom.

LITERATURA

- [1] Abdel-Wahab M., Vogl, B.: Trends of productivity growth in the construction industry across Europe, US and Japan, *Construction Management and Economics*, 29 (2011) 6, pp. 635–644.
- [2] Makroekonomija Srbije, www.makroekonomija.org
- [3] Privredna komora Srbije, www.pks.rs/PrivredaSrbije.aspx?id=7
- [4] Asbach, L., Dorndorf, U., Pesch, E.: Analysis, modeling and solution of the concrete delivery problem, *European Journal of Operational Research*, 193 (2009) 3, pp. 820–835.
- [5] Panas, A., Pantouvakis, J.P.: Evaluating Research Methodology in Construction Productivity Studies, *The Built & Human Environment Review*, 3 (2010) 1, pp. 63–85.
- [6] Leung, A., Tam, C.M., Liu, D.K.: Comparative study of artificial neural networks and multiple regression analysis for predicting hoisting times of tower cranes, *Building and Environment*, 36 (2001) 4, pp. 457–467.
- [7] Graham, L.D., Forbes, R.D., Smith, D.S.: Modeling the ready mixed concrete delivery system with neural networks, *Automation in Construction*, 15 (2006) 5, pp. 656–663.
- [8] Graham, D., Smith, S.D.: Estimating the productivity of cyclic construction operations using case-based reasoning, *Advanced Engineering Informatics*, 18 (2004) 1, pp. 17–28.
- [9] Hanna, A.S., Taylor, C.S., Sullivan, K.T.: Impact of extended overtime on construction labor productivity, *Journal of Construction Engineering and Management*, 131 (2005) 6, pp. 734–739.
- [10] Park, M., Kim, W.Y., Lee, H.S., Han, S.: Supply chain management model for ready mixed concrete, *Automation in Construction*, 20 (2011) 1, pp. 44–55.
- [11] Labban, R., AbouRizk, S., Haddad, Z., Elserly, A.: A discrete event simulation model of asphalt paving operations, *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, (2013), pp. 3215–3223, <https://doi.org/10.1109/WSC.2013.6721687>

- [12] Zankoul, E., Khoury, H.: Evaluation of Agent-Based and Discrete-Event Simulation for Modeling Construction Earthmoving Operations, Conference paper, June 2015
- [13] Thomas, H.R, Zavrski, I: Construction baseline productivity: Theory and practice, Journal of Construction Engineering and Management, 125 (1999) 5, pp. 295-303.
- [14] Dunlop, P., Smith, S.D.: Estimating key characteristics of the concrete delivery and placement process using linear regression analysis, Civil Engineering and Environmental Systems, 20 (2003) 4, pp. 273-290.
- [15] Abd-El, H.: Predicting the Production Rate of Pouring Ready Mixed Concrete Using Regression Analysis, Journal of Civil Engineering and Science, 3 (2014) 4, pp. 219-234.
- [16] Olaoluwa, O., Adesanya, D.A.: Productivity of Concrete Placement by Dumpers in Nigeria, International Journal of Engineering Research and development, 11 (2015) 3, pp. 15-28.
- [17] Anson, M., Wang, S.Q.: Performance of concrete placing in Hong Kong buildings, Journal of Construction Engineering and Management, 124 (1998) 2, pp.116-124.
- [18] Popović, B., Blagojević, B.: Matematička statistika sa primenama u hidrotehnici, drugo izdanje, Izdavačka jedinica Univerziteta u Nišu, 1999.
- [19] Mendenhall, W., Sincich, T.: A Second Course in Statistics Regression Analysis, Seventh edition, Pearson, 2011.
- [20] Statističke tablice, www.pfos.hr