

Primljen / Received: 3.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 6.6.2018.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2018.

Dostupno online / Available online: 31.8.2019.

Utjecaj konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje građenja stambenih objekata

Autori:



Dr.sc. **Boris Dimitrijević**, dipl.ing.građ.
ZOP Inženjering d.o.o., Srbija
boris.dimitrijevic@yahoo.com



Izv.prof.dr.sc. **Zoran Stojadinović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
jokazs@eunet.rs



Doc.dr.sc. **Dejan Marinković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Beogradu
Građevinski fakultet
dejan@grf.rs



Mr.sc. **Mirjana Dimitrijević**, dipl.ing.građ.
ZOP Inženjering d.o.o.,Srbija
miradebeljak@yahoo.com

Pregledni rad

Boris Dimitrijević, Zoran Stojadinović, Dejan Marinković, Mirjana Dimitrijević

Utjecaj konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje građenja stambenih objekata

Cilj istraživanja je ispitivanje utjecaja vrste konstrukcijskog sustava i trajanje na troškove građenja AB konstrukcije stambenih objekata, kao i identifikacija i kvantifikacija ključnih parametara koji na to najviše utječu. Podaci iz baze dovršenih projekata ocijenjeni su primjenom jednostrukog unakrsnog ocjenjivanja i regresijske analize. Za ključne parametre identificirane su granične numeričke vrijednosti koje su potvrđene preprojektiranjem dvaju objekata iz baze. Te vrijednosti na kvantificiran način definiraju racionalnost projektantskog rješenja kao i racionalnost planiranja organizacije građenja. Mogu se primijeniti i u praksi s ciljem racionaliziranja troškova i trajanja građenja stambenih objekata.

Ključne riječi:

stambeni objekti, konstrukcijski sustav, troškovi, trajanje, ključni parametri

Subject review

Boris Dimitrijević, Zoran Stojadinović, Dejan Marinković, Mirjana Dimitrijević

Influence of structural system on the construction time and cost of residential projects

The aim of the research is to investigate the ways in which various structural systems and time influence the cost of construction of RC structures of residential buildings, and to identify and quantify key parameters that are of highest significance in this respect. The data taken from the database of completed projects are analysed using the leave-one-out-cross-validation and regression analysis. Limit numerical values confirmed by the redesign of two structures from the database are identified as key parameters. These values define in quantitative terms the rationality of the design solution and the rationality of construction work scheduling. They can also be used in practice in order to optimise the cost and time of construction work on residential buildings.

Key words:

residential buildings, structural system, costs, duration, key parameters

Übersichtsarbeit

Boris Dimitrijević, Zoran Stojadinović, Dejan Marinković, Mirjana Dimitrijević

Auswirkungen des Konstruktionssystems auf die Kosten und die Dauer des Baus von Wohngebäuden

Das Ziel der Untersuchung ist die Überprüfung der Auswirkungen der Art des Konstruktionssystems und die Dauer auf die Baukosten von Stahlbetonkonstruktionen von Wohngebäuden, wie auch die Identifizierung und Quantifizierung von Schlüsselparametern, die sich am häufigsten darauf auswirken. Die Daten aus der Datenbank fertiggestellter Projekte wurden anhand einer Kreuzbewertung und Regressionsanalyse beurteilt. Für die Schlüsselparameter wurden numerische Grenzwerte identifiziert, die durch die Umplanung zweier Objekte aus der Datenbank bestätigt wurden. Diese Werte definieren auf quantifizierende Art und Weise die Rationalität der Projektlösung, wie auch die Rationalität der Planung der Bauorganisation. Diese können auch in der Praxis angewendet werden, um die Kosten und die Dauer des Baus von Wohngebäuden zu rationalisieren.

Schlüsselwörter:

Wohngebäude, Konstruktionssystem, Kosten, Dauer, Schlüsselparameter

1. Uvod

U građevinarstvu je za uspješno poslovanje investitora i izvođača iznimno važno smanjenje nepotrebnih troškova i rokova gradnje. Sa stajališta investitora to pridonosi povećanju dobiti i bržem obrtaju kapitala, a sa stajališta izvođača smanjenju troškova, povećanju profita i povećanju konkurentnosti na tržištu.

Izvođenje grubih građevinskih radova vrlo je važno, jer značajno utječe na ukupne troškove gradnje kao i na brzinu odvijanja svih ostalih vrsta radova. Upravo zbog toga, dinamika izvođenja grubih građevinskih radova treba biti takva da se rokovi svedu na minimum uz razumne troškove, pri čemu se moraju uzeti u obzir svi tehnološki postupci i ostvarena tražena kvaliteta radova. Predmet znanstvenog istraživanja u ovom radu jest analiza utjecaja vrste konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje građenja stambenih objekata.

Konstrukcijski sustav zgrade je sustav sačinjen od linijskih i površinskih nosivih elemenata, čija je uloga da osiguraju čvrstoću, stabilnost i otpornost objekta. Masivni, skeletni i mješoviti konstrukcijski sustavi [1] analizirani su u okviru ovog istraživanja. Kod masivnog sustava vertikalni dio armiranobetonske konstrukcije čine masivni zidovi, kod skeletnog stupovi, a kod mješovitog zidovi i stupovi [1]. Ovisno o položaju zidova masivni sustavi mogu biti poprečni, uzdužni ili kombinirani [1].

Cilj je rada ispitati utjecaj vrste konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje građenja AB konstrukcije te identifikacija i kvantifikacija ključnih parametara koji na to najviše utječu. Za ključne parametre identificirati će se granične numeričke vrijednosti kojima se na praktičan i kvantificiran način može definirati racionalnost projektantskog rješenja i racionalnost organizacije građenja. Primjenom identificiranih vrijednosti ključnih parametara moguće je unaprijediti kvalitetu projektne dokumentacije, poboljšati planiranje, smanjiti troškove i povećati učinkovitost izvođenja radova. Ovo istraživanje predstavlja nastavak, razradu i proširenje istraživanja provedenih za potrebe izrade disertacije autora [2].

2. Metodologija

Predložena metodologija istraživanja sastoji se od sljedećih koraka:

1. Formiranje i analiza baze projekata
 - formiranje baze projekata za potrebe istraživanja
 - identifikacija i kvantifikacija parametara koji utječu na troškove i trajanje izrade AB konstrukcije
 - analiza, sistematizacija i izbor ključnih parametara
2. Vrednovanje podataka iz baze projekata
 - regresijska analiza
 - pojedinačna unakrsna validacija (Leave-One-Out Cross Validation – LOOCV)
3. Testiranje - studija slučaja
4. Primjena rezultata istraživanja u praksi

Koraci navedeni u predloženoj metodologiji istraživanja detaljno su obrazloženi u sljedećim poglavljima.

Istraživanje je provedeno na temelju analize konstrukcije prema njenim svojstvima (eng. *Performance Based Design - PBD*). Takav pristup podrazumijeva primjenu alata i metoda kojima se rezultati s realiziranih projekata koriste u fazi projektiranja, kako bi gradnja novih objekata izazvala željeni učinak uz ostvarivanje planiranih rezultata [3]. U ovom slučaju svojstva su cijena i trajanje izrade konstrukcije objekta, a cilj istraživanja je definiranje numeričkih vrijednosti performansi koje treba postići u fazi projektiranja i ostvariti u fazi izgradnje objekata.

Projektiranje na bazi zadanih svojstava u svijetu se koristi u raznim područjima, ali se mali broj autora u literaturi bavi problematikom primjene PBD-a na troškove i trajanje građenja [4]. U ranim fazama realizacije projekta za procjene troškova najčešće se koriste regresijska analiza [5, 6], neuronske mreže [6] i zaključivanje na osnovi analize slučaja [7, 8]. Na građevinskim projektima PBD se uglavnom primjenjuje za zadovoljavanje tehničkih parametara kod: visokih objekata [9], analize utjecaja potresa i uragana [10-13], protupožarne zaštite [14], energetske učinkovitosti [15], projektiranja mostova [16] i nasipa [17] i dr. Osim toga, istraživanja u vezi s troškovima i trajanjem građenja nije lako provesti zbog nedostatka kvalitetne baze podataka odnosno objektivnih i usporedivih podataka s realiziranih projekata. Zbog svega navedenog nužno je da se za prethodno izvedene objekte provedu istraživanja i oblikuje popis ključnih parametara koji mogu poslužiti kao dio projektnog zadatka s ciljem projektiranja optimalne konstrukcije stambenih objekata s obzirom na troškove i trajanje izgradnje [18].

3. Baza projekata

3.1. Formiranje baze projekata za potrebe istraživanja

Baza projekata sastoji se od 28 stambenih objekata, katnosti od 5 do 9 nadzemnih etaža s ukupnim bruto površinama od 2.360 do 10.800 m² i s bruto površinama tipskih katova od 390 do 1350 m². Prilikom odabira objekata, posebno se pazilo na to da se omogući uspoređivanje podataka kako bi do izražaja došao izolirani utjecaj odabrane vrste konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje gradnje. Zbog toga su objekti izabrani na sljedeći način: svi objekti su građeni u istom gradu (Beograd), radove je izvodila jedna tvrtka sa svojom radnom snagom, korištena je oplata od samo jednog proizvođača oplata (Peri [19]), zahtijevana razina kvalitete bila je ista za sve objekte, vrijeme gradnje je bilo relativno kratko (2011. do 2017.) s usporedivim jediničnim cijenama resursa i u analizu su uvrštene samo nadzemne etaže. Izgradnja podzemnih etaža ovisi o nizu lokalnih uvjeta (geomehanika, zaštita temeljne jame, način financiranja itd.) koji su promjenjive prirode, a mogu značajno utjecati na troškove i rokove, te zbog toga nisu obuhvaćeni ovim istraživanjem.

Izvod iz baze projekata prikazan je u tablici 1., a za svaki su objekt prikazani: vrsta konstrukcijskog sustava, utrošeni resursi, ostvarene jedinične cijene resursa, ostvareni direktni

Tablica 1. Baza izmjerenih podataka na realiziranim projektima

Objekt	Površina bruto [m ²]	Proj. etaža	Vrsta konstrukcije	Materijal				Oplata	Kran	Rad			Ukupno rad [€/m ²]	Troškovi proizvodnje konstrukcije [€/m ²]	Proizvodna cijena konstrukcije troškovi poizgradnja 15% [€/m ²]	Tržišna cijena konstrukcije profit 10% [€/m ²]	Tržišna cijena zidanja [€/m ²]	Ukupna tržišna cijena GG gradova [€/m ²]	Trajanje [dan/etaža]
				Beton	Armatura	Ukupno materijal [€/m ²]	Ukupno oplata [€/m ²]			Ukupno kran [€/m ²]	Rad	Ukupno rad [€/m ²]							
			utrošak [m ³ /m ²]	cijena [€/m ³]	ukupno [€/m ²]	utrošak [kg/m ²]	cijena [€/m ²]	ukupno [€/m ²]	Ukupno kran [€/m ²]	utrošak [h/m ²]	cijena [€/h]								
1	2.603.62	7	mješovita	0,3	63,36	19,01	37,04	20,37	39,38	8,27	6,45	3,79	19,71	73,81	84,88	93,37	18,37	111,74	8,86
2	4.730.54	8	mješovita	0,29	63,24	18,34	33,66	18,51	36,85	7,37	4,06	3,84	19,97	68,25	78,49	86,34	16,26	102,6	9,38
3	7.912.70	9	mješovita	0,28	63,25	17,71	37,38	20,56	38,27	7,66	2,83	3,48	18,1	66,86	76,88	84,57	17,47	102,04	10,22
4	9.115.00	9	mješovita	0,28	62,75	17,57	36,21	19,92	37,49	7,19	2,42	3,44	17,89	64,98	74,73	82,2	18,65	100,85	10
5	7.456.72	9	mješovita	0,28	63,24	17,71	38,08	20,94	38,65	6,67	2,83	3,47	18,04	66,2	76,12	83,74	18,54	102,28	9,44
6	7.484.40	9	mješovita	0,29	63,15	18,31	38,11	20,96	39,27	7,03	2,87	3,7	19,24	68,41	78,68	86,54	17,37	103,91	9,67
7	10.796.63	9	mješovita	0,28	62,95	17,63	30,53	16,79	34,42	6,87	2,02	3,51	18,25	61,56	70,79	77,87	18,49	96,36	9,89
8	4.810.50	8	mješovita	0,29	63,26	18,35	34,39	18,91	37,26	7,89	4,00	3,61	18,77	67,92	78,11	85,92	17,05	102,97	9,38
9	3.324.00	7	mješovita	0,32	63,24	20,24	37,45	20,60	40,83	8,36	5,56	3,87	20,12	74,88	86,11	94,72	16,82	111,54	10,14
10	2.676.00	7	mješovita	0,31	63,38	19,65	38,71	21,29	40,94	8,74	6,9	3,57	18,56	75,14	86,41	95,06	17,93	112,99	10,14
11	8.607.33	8	masivni poprečni	0,32	63,88	20,44	41,61	22,89	43,33	8,12	2,43	3,89	20,23	74,11	85,22	93,74	16,29	110,03	10,5
12	6.423.53	7	masivni poprečni	0,31	63,25	19,61	42,48	23,36	42,97	8,72	2,88	4,21	21,89	76,46	87,93	96,73	15,56	112,29	10,14
13	6.280.30	7	masivni poprečni	0,33	63,49	20,95	41,93	23,06	44,01	8,38	2,94	4,13	21,48	76,81	88,33	97,16	15,71	112,87	10,14
14	5.964.70	8	skeletni	0,25	62,76	15,69	34,91	19,20	34,89	6,02	3,04	3,07	15,96	59,91	68,9	75,79	20,93	96,72	8,25
15	6.027.81	8	skeletni	0,26	62,84	16,34	37,10	20,41	36,74	6,12	3,34	3,12	16,22	62,43	71,79	78,97	20,56	99,53	8,63
16	6.050.89	8	skeletni	0,26	62,84	16,34	37,77	20,77	37,11	5,9	3,42	2,98	15,5	61,93	71,22	78,34	20,49	98,83	8
17	3.946.54	6	skeletni	0,25	62,84	15,66	37,31	20,52	36,18	7,56	4,02	3,08	16,02	63,78	73,34	80,68	23,39	104,07	6,86
18	3.806.00	7	skeletni	0,26	62,64	16,3	38,52	21,19	37,48	7,67	3,82	3,21	16,69	65,66	75,51	83,07	23,22	106,29	7,14
19	2.379.00	5	skeletni	0,27	62,97	17,00	31,51	17,33	34,33	6,52	4,78	3	15,6	61,23	70,42	77,46	20,36	97,82	6,6
20	2.508.00	5	skeletni	0,28	63,11	17,67	31,63	17,40	35,07	6,61	4,76	3,11	16,17	62,61	72	79,2	20,28	99,48	7,2
21	2.924.50	5	skeletni	0,26	62,52	16,26	30,46	16,75	33,01	6,16	4,02	2,82	14,66	57,85	66,53	73,18	22,48	95,66	7
22	2.474.00	5	skeletni	0,28	63,17	17,69	30,83	16,96	34,64	6,68	4,75	2,98	15,5	61,57	70,81	77,89	22,14	100,03	7
23	2.363.00	5	skeletni	0,27	62,86	16,97	31,22	17,17	34,14	7,14	4,97	3,13	16,28	62,53	71,91	79,1	20,04	99,14	7
24	5.530.00	8	masivni oba pravca	0,35	65,68	22,99	39,76	21,87	44,86	9,96	3,98	5,45	28,34	87,14	100,21	110,23	10,56	120,79	11,25
25	3.379.00	6	masivni oba pravca	0,38	65,5	24,89	40,44	22,24	47,13	11,15	5,19	5,49	28,55	92,02	105,82	116,41	12,25	128,66	11
26	4.912.00	8	masivni oba pravca	0,37	65,49	24,23	40,11	22,06	46,29	9,96	4,37	5,14	26,73	87,35	100,45	110,5	14,07	124,57	10,88
27	5.250.96	8	masivni oba pravca	0,36	65,9	23,72	47,14	25,93	49,65	9,49	4,2	5,75	29,9	93,24	107,23	117,95	8,79	126,74	11,28
28	4.832.32	8	masivni oba pravca	0,37	65,46	24,22	44,62	24,54	48,76	9,23	4,48	5,84	30,37	92,84	106,77	117,44	8,63	126,07	11

troškovi proizvodnje, proizvodna i tržišna cijena konstrukcije, tržišna cijena zidanja, tržišna cijena grubih građevinskih radova i prosječna trajanja tipskih etaža po objektima. Ostvareni direktni troškovi proizvodnje konstrukcije su dobiveni kao zbroj proizvoda izmjerenih utroška izabranih parametara i njihovih ostvarenih jediničnih cijena. Proizvodna cijena konstrukcije predstavlja zbroj direktnih i indirektnih troškova poslovanja tvrtke (15 % direktnih troškova). Tržišna cijena konstrukcije dobivena je uvećanjem proizvodne cijene za profit tvrtke u iznosu od 10 % [2].

3.2. Identifikacija i kvantifikacija parametara koji utječu na troškove i trajanje izrade AB konstrukcije

Troškovi i trajanje izrade armiranobetonske konstrukcije izravno ovise o potrošenom materijalu, opremi, mehanizaciji, radnoj snazi i njihovim jediničnim cijenama. Dominantni materijali koji značajno utječu na troškove konstrukcije su beton i armatura. Jedinične cijene betona se razlikuju po objektima, a njihove vrijednosti su izračunane na temelju jediničnih cijena i udjela pojedinih vrsta betona u ukupnoj količini betona. Primjerice, za betoniranje vertikalnih armiranobetonskih elemenata primijenjen je samozbijajući beton s jediničnom cijenom c_1 i udjelom u_1 , a za horizontalne armiranobetonskih elemente običan pumpani beton s jediničnom cijenom c_2 i udjelom u_2 . Na temelju toga izračunana je prosječna jedinična cijena betona na razini objekta prema jednadžbi:

$$c = c_1 \cdot u_1 + c_2 \cdot u_2 \quad (1)$$

Kada je u pitanju mehanizacija, izdvajaju se građevinski strojevi za vertikalni transport i strojevi za betonske radove. Rad strojeva za betonske radove obračunan je kroz jedinične cijene betona, a za vertikalni transport oplata i drugih materijala predviđena je toranjska dizalica. Da bi se omogućila usporedba podataka i izbjegao utjecaj različitih uvjeta izvođenja, u bazu podataka su upisani samo objekti koji imaju sličnu duljinu transporta svježeg betona (do 5 km), odnosno istu cijenu vanjskog transporta i kod kojih je unutrašnji transport obavljen na isti način (autopumpe). Na temelju toga, kao parametri čiji će utjecaj na troškove i trajanje izrade AB konstrukcije biti ispitan, izdvojeni su sljedeći

resursi: beton, armatura, oplata, dizalica i radna snaga [2]. Radi usporedbe podataka i univerzalnosti primjene, utrošci navedenih resursa prikazani su po četvornim metrima bruto površine objekta.

Pri ispitivanju stvarnog utjecaja konstrukcijskog sustava na troškove gradnje treba uzeti u obzir činjenicu da različiti konstrukcijski sustavi zahtijevaju različitu količinu materijala potrebnog za zidane radove, odnosno izgradnju stambenih jedinica. Zbog toga, kao glavni parametar za ocjenu troškova konstrukcijskog sustava, odabrana je tržišna cijena grubih građevinskih radova po bruto površini objekta, čime je osigurana usporedivost različitih konstrukcijskih sustava [2]. Pod grubim građevinskim radovima u okviru ovog istraživanja podrazumjevaju se radovi na armiranobetonskoj konstrukciji i zidanju.

Trajanje tipske etaže ovisi o količini radova, odnosno o ukupnom broju potrebnih radnih sati i angažiranom broju radnika. Da bi uvjeti rada, odnosno intenzitet bili isti na svim objektima, po jednom radniku je osigurana približno ista prosječna veličina radnog prostora (oko 25 m²). Na taj način osigurano je da se trajanje etaže prije svega promatra u funkciji odabranog konstrukcijskog sustava.

Utjecaj zidarskih radova na trajanje nije razmatran, jer se oni uobičajeno organiziraju tako da prate brzinu gradnje konstrukcije, a različite količine zidanih radova kod različitih konstrukcijskih sustava se rješavaju optimalnim izborom broja radnika.

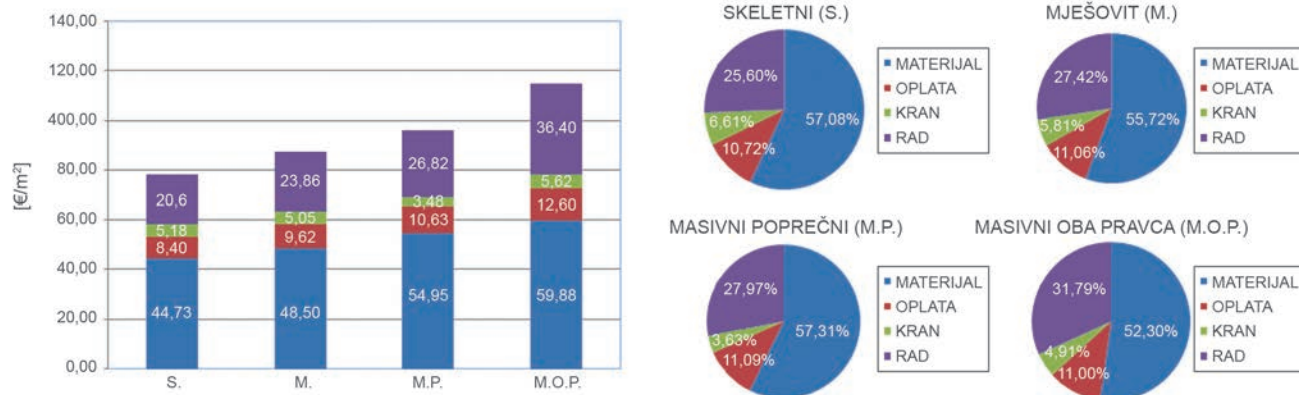
3.3. Analiza, sistematizacija i izbor ključnih parametara

U tablici 1. prikazana je klasifikacija i grupiranje objekata prema vrsti konstrukcijskog sustava i uspostavljena je veza između izabranih parametara i trajanja i cijene građenja. Tržišne cijene izvođenja grubih građevinskih radova u granicama su od 95,66 do 128,66 €/m², a prosječna trajanja izvođenja tipskih etaža iznose od 6,60 do 11,28 dana po katu.

Za različite konstrukcijske sustave određene su prosječne tržišne cijene konstrukcije, zidanja i grubih građevinskih radova (GG radovi), kao i prosječna trajanja tipskih etaža (tablica 2.). Tržišna cijena konstrukcije je najniža kod skeletnog

Tablica 2. Prosječne tržišne cijene konstrukcije, grubih građevinskih radova i prosječno trajanje izvođenja tipske etaže

Vrsta konstrukcije	Tržišna vrijednost konstrukcije (struktura cijene)					Tržišna vrijednost zidanja [€/m ²]	Tržišna vrijednost GG radova [€/m ²]	Trajanje [dan/etaža]
	Materijal [€/m ²]	Oplata [€/m ²]	Kran [€/m ²]	Rad [€/m ²]	Ukupno [€/m ²]			
Skeletni	44,73	8,4	5,18	20,06	78,37	21,39	99,76	7,37
Mješoviti	48,5	9,62	5,05	23,86	87,03	17,7	104,73	9,71
Masivni poprečni	54,95	10,63	3,48	26,82	95,88	15,85	111,73	10,26
Masivni oba pravca	59,88	12,6	5,62	36,4	114,5	10,86	125,36	11,08



Slika 1. Struktura tržišne cijene konstrukcije prema konstrukcijskom sustavu

konstrukcijskog sustava, a najviša kod masivnog sustava u oba pravca (tablica 2.). Cijene materijala, opreme i rada također rastu od skeletnog prema masivnom sustavu, ali ne istim intenzitetom (slika 1.).

Iz prikazanih dijagrama (slika 1.) može se zaključiti to da oplata i dizalica zadržavaju konstantni udio u ukupnoj cijeni konstrukcije koji iznosi približno 15%, dok je udio materijala i rada vrlo značajan i iznosi približno 85% ukupnih troškova konstrukcije. Zbog toga se beton, armatura i rad smatraju ključnim parametrima koji presudno utječu na troškove konstrukcije. Prosječni trošci ključnih parametara po četvornom metru bruto površine objekta rastu od skeletnog prema masivnom konstrukcijskom sustavu (tablica 3.).

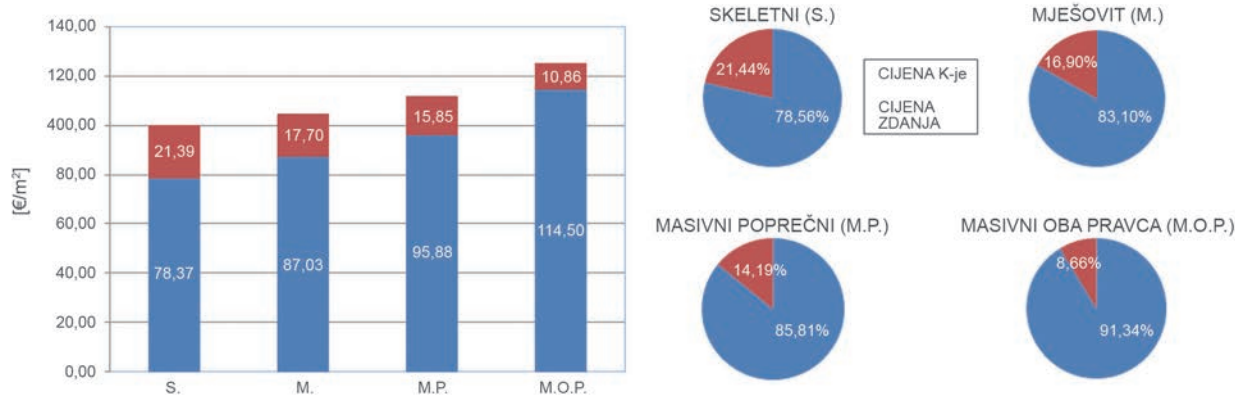
Tablica 3. Prosječni utrošak ključnih parametara prema tipu AB konstrukcije

Vrsta konstrukcije	Prosječni utrošci ključnih parametara		
	Beton [m³/m²]	Armatura [kg/m²]	Rad [h/m²]
Skeletni	0,26	34,13	3,05
Mješoviti	0,29	36,16	3,63
Masivni poprečni	0,32	42,01	4,08
Masivni oba pravca	0,37	42,41	5,53

Količina rada je najveća kod masivnog sustava sa zidovima u oba pravca (slika 1.), zbog čega je i trajanje izgradnje tipse etaže najduže. Ukupna tržišna cijena grubih građevinskih radova, kao i tržišna cijena konstrukcije su najniže kod skeletnog sustava i rastu za mješoviti i masivni konstrukcijski sustav, dok istovremeno tržišna cijena zidanja opada (slika 2.). U odnosu na skeletni konstrukcijski sustav, grubi građevinski radovi na svim ostalim sustavima su skuplji: mješoviti sustav za 4,98%, masivni poprečni za 12% i masivni u oba pravca za 25,66%. Trajanje tipse etaže kod ostalih konstrukcijskih sustava je duže nego kod skeletnog: mješoviti za 31,75%, masivni poprečni za 39,21% i masivni u oba pravca za 50,34%. Na ovaj način dokazano je to da izbor konstrukcijskog sustava ima značajan utjecaj na troškove i trajanje gradnje konstrukcije stambenih objekata za promatrani skup podataka (zgrada).

4. Validacija podataka iz baze projekata

Validacija podataka iz baze projekata, radi određivanja njihove mjerodavnosti za nastavak ispitivanja, provedena je primjenom regresijske analize i pojedinačne unakrsne validacije. Provjera mjerodavnosti podataka provedena je za dvije karakteristične veličine: ukupnu tržišnu cijenu grubih građevinskih radova i trajanje građenja konstrukcije tipse etaže, čije vrijednosti ovise o utrošcima ključnih parametara [2]. Navedene veličine su izabrane jer omogućavaju ispravnu usporedivost različitih konstrukcijskih sustava.



Slika 2. Struktura tržišne cijene grubih građevinskih radova prema konstrukcijskom sustavu

4.1. Regresijska analiza

Regresijskom analizom ispituje se ovisnost među pojavama s ciljem da se na temelju jedne ili više nezavisnih promjenljivih varijabli procijeni vrijednost zavisno promjenjive varijable. Regresijska analiza podrazumijeva logično definiranje uzročno-posljedične veze između pojava [20]. U ovom istraživanju uzrok je promjena konstrukcijskog sustava koji se kvantificira kroz količine ključnih parametara (beton, armatura, radna snaga), a posljedica je promjena cijene i trajanje građenja [2]. S obzirom na mali broj podataka u bazi, može se primijeniti jednostruka regresija u kojoj mora biti najmanje 12 parova podataka [20]. Da bi se osigurali preduvjeti za primjenu jednostruke regresije nužno je nezavisnu promjenjivu varijablu prikazati kao mješovitu mjeru triju ključnih parametara: količine betona U_B (m^3/m^2), količine armature U_A (kg/m^2) i utroška rada U_R (h/m^2). Budući da navedeni parametri imaju različite jedinice mjere, izračunane su njihove normalizirane vrijednosti [7]:

$$U_{i,norm} = \bar{U}_i = \begin{cases} \frac{(U_i - U_{i,min})}{(U_{i,max} - U_{i,min})} & \forall U_{i,max} > U_{i,min} \\ 0,50 & \forall U_{i,max} = U_{i,min} \end{cases} \quad (2)$$

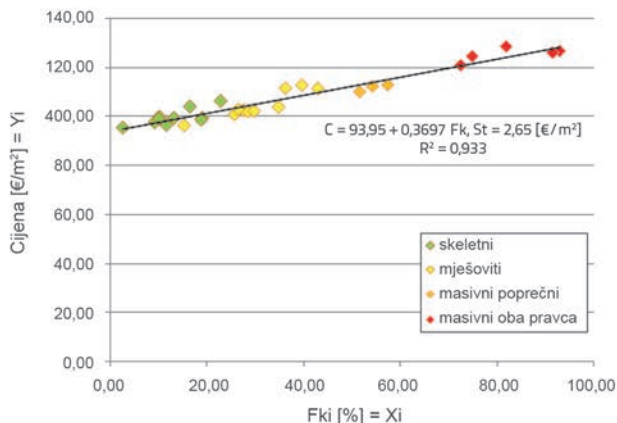
Na osnovi normaliziranih vrijednosti i usvojenih težinskih koeficijenata, objedinjeni su ključni parametri [21] i određen je faktor konstrukcije $F_{k,i}$ [2]:

$$F_{k,i} (\%) = W_B \bar{U}_{B,i} + W_A \bar{U}_{A,i} + W_R \bar{U}_{R,i} \quad (3)$$

gdje su:

- $\bar{U}_{B,i}, \bar{U}_{A,i}$ i $\bar{U}_{R,i}$ - normalizirane količine betona, armature i rada
- W_B, W_A i W_R - težinski koeficijenti za potrošnju betona, armature i rada.

Pri tome sva tri ključna parametra (beton, armatura i rad) jednako su važna pa su jednaki i težinski koeficijenti: $W_B = W_A = W_R = 33 \%$. Proračun faktora konstrukcije za svih 28 objekata prikazan je u tablici 4.



U radu su prikazana dva jednostruka regresijska modela. U oba slučaja za nezavisnu promjenjivu X_i uzet je faktor konstrukcije $F_{k,i}$ (%), a zavisna promjenjiva Y_i prikazana je kao cijena građenja C_i ($€/m^2$), odnosno kao trajanje građenja T_i (dan/etaža) [2]. Parovi podataka za regresijske modele prikazani su u tablici 4.

Na osnovi tablice 4. formirani su dijagrami rasipanja za cijenu grubih građevinskih radova i trajanje izrade konstrukcije tipske etaže (slika 3.). Na osnovi dijagrama rasipanja uočeno je da krivulja regresije za cijenu građenja u odnosu na faktor konstrukcije ima približno linearnu zavisnost (slika 3.), dok je krivulja regresije za trajanje građenja tipske etaže približno logaritamskog oblika (slika 3.).

Regresijske krivulje za cijenu i trajanje građenja sa standardnim greškama regresije i koeficijentom determinacije R^2 prikazani su jednadžbama (4) i (5):

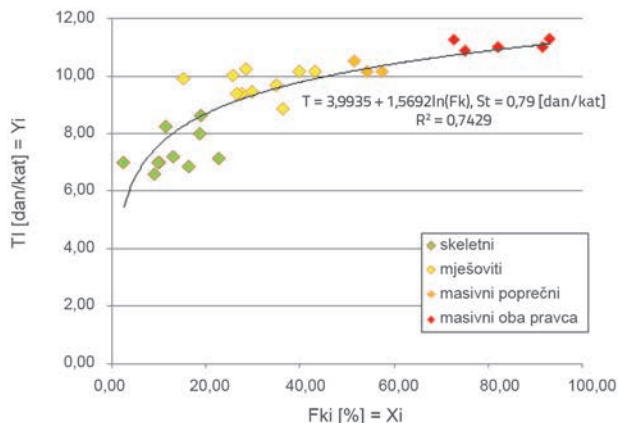
$$C = 93,95 + 0,3697 \cdot F_{k,i}, \quad St = 2,65 \text{ (€/m}^2\text{)}, \quad R^2 = 0,933 \quad (4)$$

$$T = 3,9935 + 1,5692 \cdot \ln(F_{k,i}), \quad St = 0,79 \text{ (dan/etaža)}, \quad R^2 = 0,7429 \quad (5)$$

Visoke vrijednosti koeficijenata determinacije upućuju na to da se značajan udio varijabilnosti zavisnih promjenljivih (93,3 % kod cijene i 74,29 % kod trajanja građenja) može objasniti faktorom konstrukcije kao nezavisnom promjenjivom varijablom. To pokazuje da su oba modela zadovoljavajuće kvalitete, ali da regresijski model za cijenu ima veću preciznost predviđanja zavisne varijable.

Da bi primjena regresijskog modela za predviđanje zavisne promjenjive varijable bila opravdana nužno je provesti testiranje značajnosti regresijske veze, odnosno ispitati je li objašnjavajuća varijabla značajna za ponašanje zavisne promjenjive varijable [22]. Testiranje značajnosti modela provedeno je primjenom F-testa (tablica 5.). Ako je izračunana vrijednost F veća od F_{kr} , odbacuje se nulta hipoteza i prihvaća se alternativna hipoteza, odnosno koeficijent uz nezavisnu promjenjivu u regresijskoj jednadžbi je različit od nule.

Iz tablica za F test [23] za razinu pouzdanosti od 99 % i broj stupnjeva slobode $n_1 = 1$ i $n_2 = 26$ dobiva se $F_{kr(1;26;0,01)} = 7,72$. Kod regresijskog modela za cijenu grubih građevinskih radova izračunana je vrijednost $F = 362,155$ veća od F_{kr} , na temelju čega



Slika 3. Dijagrami rasipanja i regresijske krivulje za cijenu i trajanje građenja

Tablica 4. Proračun faktora konstrukcije i ulazni podaci za regresijski model

Objekt	Vrsta konstrukcije	Podaci za proračun faktora konstrukcije						Parovi podataka		
		Beton	Armatura	Rad	Beton	Armatura	Rad	Faktor konstrukcije	Ukupna tržišna cijena	Trajanje izrade
		utrošak [m ³ /m ²]	utrošak [kg/m ²]	utrošak [h/m ²]	nor.utr. [%]	nor.utr. [%]	nor.utr. [%]	Xi=Fki [%]	Yi=Ci [€/m ²]	Yi=Ti [dan/etaža]
1	mješoviti	0,3	37,04	3,79	38,46	39,45	32,12	36,31	111,74	8,86
2	mješoviti	0,29	33,66	3,84	30,77	19,18	33,77	27,63	102,6	9,38
3	mješoviti	0,28	37,38	3,48	23,08	41,49	21,85	28,52	102,04	10,22
4	mješoviti	0,28	36,21	3,44	23,08	34,47	20,53	25,77	100,85	10
5	mješoviti	0,28	38,08	3,47	23,08	45,68	21,52	29,79	102,28	9044
6	mješoviti	0,29	38,11	3,7	30,77	45,86	29,14	34,9	103,91	9,67
7	mješoviti	0,28	30,53	3,51	23,08	0,42	22,85	15,29	96,36	9,98
8	mješoviti	0,32	34,39	3,61	30,77	23,56	26,16	26,56	102,97	9,38
9	mješoviti	0,31	37,45	3,87	53,85	41,91	34,77	43,07	111,54	10,14
10	mješoviti	0,32	38,71	3,57	46,15	49,91	24,83	39,75	112,99	10,14
11	masivni poprečni	0,31	41,61	3,89	53,85	66,85	35,43	51,52	110,03	10,5
12	masivni poprečni	0,33	42,48	4,21	46,15	72,06	46,03	54,2	112,29	10,14
13	masivni poprečni	0,25	41,93	4,13	61,54	68,76	43,38	57,31	112,87	10,14
14	skeletni	0,26	34,91	3,07	0	26,68	8,28	11,54	96,72	8,25
15	skeletni	0,26	37,1	3,12	7,69	39,81	9,93	18,95	99,53	8,63
16	skeletni	0,25	37,77	2,98	7,69	43,82	5,3	18,75	98,83	8
17	skeletni	0,26	37,31	3,08	0	41,07	8,61	16,39	104,07	6,86
18	skeletni	0,27	38,52	3,21	7,69	48,32	12,91	22,75	106,29	7,14
19	skeletni	0,28	31,51	3	15,38	6,29	5,96	9,12	97,82	6,6
20	skeletni	0,26	31,63	3,11	23,08	7,01	9,6	13,1	99,48	7,2
21	skeletni	0,28	30,46	2,82	7,69	0	0	2,54	95,66	7
22	skeletni	0,27	30,83	2,98	23,08	2,22	5,3	10,1	100,03	7
23	skeletni	0,27	31,22	3,13	15,38	4,56	10,26	9,97	99,14	7
24	masivni oba pravca	0,35	39,76	5,45	76,92	55,76	87,09	72,52	120,79	11,25
25	masivni oba pravca	0,38	40,44	5,49	100	59,83	88,41	81,92	128,66	11
26	masivni oba pravca	0,37	40,11	5,14	92,31	57,85	76,82	74,9	124,57	10,88
27	masivni oba pravca	0,36	47,14	5,75	84,62	100	97,02	92,94	126,74	11,28
28	masivni oba pravca	0,37	44,62	5,84	92,31	84,89	100	91,48	126,07	11

Tablica 5. F-test za regresijske modele za cijenu i trajanje građenja

F test - regresijski model za cijenu građenja grubih građevinskih radova					
Izvor	Br. stupnjeva slobode	Zbroj kvadrata	Srednji kvadrat	F	P > F
Model	1	2544.712	2544.712	362,155	< 0,00001
Pogreška	26	182.691	7.027		
Ukupno	27	2727.403			
F test - regresijski model za trajanje izrade konstrukcije					
Model	1	47.045	47.045	75,137	< 0,00001
Pogreška	26	1.279	0.626		
Ukupno	27	63.324			

se zaključuje da je opravdana njegova primjena. Kod regresijskog modela za trajanje građenja izračunana je vrijednost $F = 75,137 > F_{kr}$, na temelju čega je također zaključeno da je opravdana primjena tog regresijskog modela.

Regresijski modeli za cijenu i trajanje građenja konstrukcije tipske etaže (slika 3.) predstavljaju rezultate za dobro organizirane građevinske tvrtke koje zapošljavaju stručan tehnički kadar, uigrane radne ekipe i koje primjenjuju suvremene oplatne sustave [2]. Za lošije organizirana poduzeća, rezultati dobiveni u radu mogu poslužiti kao ciljane vrijednosti kojima treba težiti na budućim projektima, što pridonosi primjeni provedenog istraživanja u građevinskoj praksi.

4.2. Pojedinačna unakrsna validacija

Provjera primjenjivosti regresijskih modela za predviđanje cijene i trajanja građenja konstrukcije novih objekata provedena je primjenom metode unakrsne validacije (eng. *cross-validation*), koja podrazumijeva da se skup podataka dijeli na trening skup i validacijski skup [24]. Trening skup služi da se oblikuje pretpostavljeni model, a validacijski skup da se utvrde pogreške i točnost modela. S obzirom na to da se radi o malom uzorku od 28 objekata, u radu je primijenjena metoda pojedinačnog unakrsnog ocjenjivanja (eng. *Leave-One-Out Cross Validation – LOOCV*) [24, 25]. Postupak primjene LOOCV u ovom slučaju, podrazumijeva da se iz skupa objekata izdvoji jedan, a da se pretpostavljeni model oblikuje na temelju podataka iz preostalih $n-1$ objekata. U sljedećem koraku se za izdvojeni objekt izračunava vrijednost zavisne promjenjive kojom se procjenjuje i utvrđuje greška procjene. Postupak se ponavlja za svih n objekata u uzorku [24].

Kao mjera preciznosti predviđanja regresijskog modela u radu su primijenjene srednja apsolutna pogreška procjene MAE (eng. *Mean Absolute Error*) [26], korijen srednje kvadratne greške procjene RMSE (eng. *Root-Mean-Squared Error*) [27] i normalizirani korijen srednje kvadratne greške procjene NRMSD (eng. *Normalized Root-Mean-Squared Error*). Normalizacija je izvedena u odnosu na srednju vrijednost zavisne promjenjive \bar{Y} i u odnosu na raspon vrijednosti u uzorku $Y_{max} - Y_{min}$ [26].

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE_1 = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \quad (8)$$

$$NRMSE_2 = \frac{RMSE}{(Y_{max} - Y_{min})} \quad (9)$$

Za regresijski model za predviđanje cijene grubih građevinskih radova dobiveni su sljedeći rezultati: MAE = 2,42, RMSE = 2,74 (tablica 6.), $NRMSE_1 = 2,55\%$ i $NRMSE_2 = 8,31\%$.

Za regresijski model za predviđanje trajanja izgradnje tipske etaže dobiveni su sljedeći rezultati: MAE = 0,63, RMSE = 0,86, $NRMSE_1 = 9,39\%$ i $NRMSE_2 = 18,41\%$.

Dobiveni rezultati pokazuju da su oba modela u pogledu preciznosti predviđanja zadovoljavajuće kvalitete, ali da regresijski model za cijenu grubih građevinskih radova u tom smislu ima bolje karakteristike (manje vrijednosti NRMSD).

5. Ispitivanje - studija slučaja

Ispitivanje rezultata istraživanja provedeno je na studiji slučaja, kojom su obuhvaćena dva objekta (br. 27 i 28) iz baze projekata [2]. Ti objekti, koji su najprije bili projektirani kao masivni konstrukcijski sustavi sa zidovima u oba pravca, naknadno su preprojektirani u skeletni konstrukcijski sustav u skladu s rezultatima istraživanja. Nova projektna rješenja zadovoljavaju predložena svojstva, odnosno predložene vrijednosti ključnih parametara (tablica 7.). Tržišna cijena grubih građevinskih radova i trajanje izrade AB konstrukcije su smanjene, što pokazuje opravdanost primjene rezultata istraživanja u ovom radu. Tržišna cijena grubih građevinskih radova smanjila se sa 123,80 €/m² za masivni konstrukcijski sustav u oba pravca na 99,37 €/m² (objekt br.27), odnosno sa 121,74 €/m² na 99,73 €/m² (objekt br.28), dok je trajanje radova smanjeno s 11 na 8 dana

Tablica 6. Primjena LOOCV za regresijski model za cijenu grubih građevinskih radova

Objekt	$X_i = F_{ki}$	$Y_i = C_i$	Regresijska jednadžba	\hat{Y}_i	$\hat{Y}_i - \bar{Y}_i$	$(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$
1	36,31	111,74	$y = 0,3698x + 93,7883$	107,214	4,523	20,458
2	27,63	102,6	$Y = 0,3690x + 94,0363$	204,232	1,634	2,672
3	28,52	102,04	$Y = 0,3687x + 94,0803$	104,594	2,553	6,516
4	25,77	100,85	$Y = 0,3682x + 94,1044$	103,591	2,737	7,492
5	29,79	102,28	$Y = 0,3688x + 94,0857$	105,073	2,796	7,815
6	34,9	103,91	$Y = 0,3695x + 94,0677$	106,965	3,052	9,313
7	15,29	96,36	$Y = 0,3658x + 94,2150$	99,810	3,447	11,884
8	26,56	102,97	$Y = 0,3693x + 93,9959$	103,805	0,834	0,696
9	43,07	111,54	$Y = 0,3691x + 93,9111$	109,810	1,731	2,997
10	39,75	112,99	$Y = 0,3689x + 93,8193$	108,483	4,502	20,265
11	51,52	110,03	$Y = 0,3723x + 93,8193$	113,150	3,117	9,714
12	54,2	112,29	$Y = 0,3715x + 93,9517$	114,086	1,799	3,237
13	57,31	112,87	$Y = 0,3725x + 93,9517$	115,285	2,412	5,816
14	11,54	96,72	$Y = 0,3676x + 94,0851$	98,326	1,604	2,573
15	18,95	99,53	$Y = 0,3683x + 94,0851$	101,036	1,506	2,267
16	18,75	98,83	$y = 0,3677x + 94,1020$	100,996	2,167	4,697
17	16,39	104,07	$y = 0,3744x + 93,6290$	99,766	4,301	18,502
18	22,75	106,29	$y = 0,3728x + 93,6941$	102,173	4,113	16,919
19	9,12	97,82	$y = 0,3705x + 93,9025$	97,282	0,537	0,288
20	13,1	99,48	$y = 0,3707x + 93,8906$	98,746	35	0,540
21	2,54	95,66	$y = 0,3713x + 93,8629$	94,805	0,858	0,735
22	10,1	100,03	$y = 0,3720x + 93,8087$	97,499	2,527	6,385
23	9,97	99,14	$y = 0,3720x + 93,8087$	97,517	1,622	2,632
24	72,52	120,79	$y = 3697 + 93,3510$	120,763	0,025	0,001
25	81,92	128,66	$y = 0,3571x + 94,2260$	123,477	5,178	26,814
26	74,9	124,57	$y = 0,3629x + 94,0809$	121,264	3,304	10,914
27	92,94	126,74	$y = 0,3758x + 93,8015$	128,727	1,988	3,950
28	91,48	126,07	$y = 0,3760x + 93,7973$	128,196	2,124	4,513
Ukupno:					67,725	210,604
					MAE: 2,42	RMSE = 2,74

Tablica 7. Promjena tržišne cijene grubih građevinskih radova i trajanja radova na konstrukciji tipske etaže pri promjeni konstrukcijskog sustava

Objekt	Izvedeno stanje/ Preprojektirano stanje	Utrošak osnovnih resursa			Direktni troškovi proizvodnje konstrukcije (struktura cijene)					Tržišna vrijednost konstrukcije [€/m ²]	Tržišna vrijednost zidanja [€/m ²]	Tržišna vrijednost GG radova [€/m ²]	Trajanje radova na konstrukciji [dan/etaža]
		beton [m ³ /m ²]	armatura [kg/m ²]	rad [h/m ²]	materijal [€/m ²]	oplata [€/m ²]	kran [€/m ²]	rad [€/m ²]	ukupno [€/m ²]				
27	masivni oba pravca	0,36	47,64	5,31	49,6	9,36	4,34	27,61	90,91	115,01	8,79	123,8	11
	skeletni	0,26	33,21	3,12	35,17	6,65	3,35	16,22	61,39	77,66	21,71	99,37	8
28	masivni oba pravca	0,36	46,52	5,14	48,99	9,36	4,34	26,73	89,41	113,11	8,63	121,74	10
	skeletni	0,26	31,05	3,36	33,98	6,65	3,35	17,47	61,45	77,73	22	99,73	8

po etaži (objekt br. 27), odnosno s 10 na 8 dana po etaži (objekt br. 28), što predstavlja smanjenje cijene radova od približno 20 % i skraćivanje roka za približno 25 %.

Preprojektirani objekti iz baze ujedno su poslužili za provjeru točnosti regresijskih modela iz poglavlja 4.1. Primjenom jednadžbe regresije za cijene grubih građevinskih radova dobivene su sljedeće vrijednosti: 98,15 €/m² za objekt br. 27 (izmjereno 99,37 €/m²) i 97,54 €/m² za objekt br. 28 (izmjereno 99,73 €/m²), što je u granicama izračunane standardne pogreške regresije (2,65 €/m²).

Primjenom jednadžbe regresije za trajanje izrade konstrukcije tipske etaže (poglavlje 4.1) dobivene su sljedeće vrijednosti: 7,81 dana po etaži za objekt br. 27 (izmjereno 8 dana) i 7,56 dana po etaži za objekt br. 28 (izmjereno 8 dana), što je u granicama izračunane standardne pogreške regresije (0,79 dan/etaži).

Na osnovi svega navedenog može se zaključiti da se uvođenjem povratnih informacija iz izvođačke prakse u proces projektiranja može značajno unaprijediti kvaliteta i racionalizacija projektne dokumentacije s obzirom na troškove i trajanje radova.

6. Primjena rezultata istraživanja u praksi

Tema razmatrana u ovom radu vrlo je široka i složena. Može se promatrati sa stajališta investitora, ali i izvođača, kao i kroz različite faze realizacije projekta. Glavni rezultati istraživanja odnose se na izbor optimalnog konstrukcijskog sustava i kvantificiranje ključnih parametara koji značajno utječu na cijenu i trajanje izrade armiranobetonske konstrukcije. Primjena navedenih rezultata u praksi može biti višestruka, a u okviru rada se navode glavni pravci mogućih primjena. To se prije svega odnosi na unaprjeđenje procesa projektiranja (primjena PBD-a) i fazu planiranja realizacije radova za koju su zaduženi izvođači.

6.1. Primjena rezultata istraživanja – faza izrade projektne dokumentacije

Pri realizaciji građevinskih projekata investitori i izvođači (svatko sa stajališta svojih interesa) žele racionalizaciju troškova, ostvarenje tražene kvalitete radova i kraće rokove gradnje. Za investitore je posebno važna faza izrade projektne dokumentacije, kada se može ostvariti oko 90 % od svih mogućih ušteda na projektu [28]. S druge strane, cijena radova koju ponudi izvođač zavisi od usvojenih projektantskih rješenja, ali i od razine organizacije posla i učinkovitosti izvođača.

Ključni korak u fazi izrade projektne dokumentacije predstavlja oblikovanje kvantificiranog projektnog zadatka kojim se precizno definiraju tražena svojstva projekta i vrijednosti željenih parametara. Kao mjera za ocjenu kvalitete projektiranja s obzirom na troškove gradnje predložena je granična potrošnja betona i armature [2]. Za granične potrošnje usvojene su sljedeće vrijednosti (tablica 3.):

- potrošnja betona $\leq 0,30 \text{ m}^3/\text{m}^2$,
- potrošnja armature $\leq 37 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Navedene potrošnje vrijede za dominantanu vrstu gradnje stambenih objekata u Beogradu.

U fazi izrade projektne dokumentacije poželjno je uzeti u obzir i normu sati, ali projektni uredi nemaju interesa za to, pa bi investitor morao angažirati stručnjake iz tog područja. Međutim, iz rezultata istraživanja može se zaključiti to da primjena skeletnog konstrukcijskog sustava podrazumijeva i manji broj radnih sati, čime se stvaraju preduvjeti da izvođač ponudi nižu cijenu radova.

Primjena rezultata istraživanja tijekom izrade projektne dokumentacije odvija se u skladu s faznim napretkom projektiranja. Tako primjerice u fazi izrade koncepcije i idejnih rješenja ključan je odabir optimalnog konstrukcijskog sustava. Najbolji rezultati u istraživanju postignuti su kod skeletnog i mješovitog sustava. Primjenom tih sustava stvaraju se preduvjeti da potrošnja ključnih resursa bude u predloženim granicama. Također u ovoj fazi moguće je na temelju odabrane dispozicije i stručne procjene pretpostaviti okvirnu potrošnju betona i armature što omogućava lakšu usporedbu varijantnih rješenja. Cilj takvog pristupa je da se odmah na početku procesa projektiranja izbjegnue neadekvatna rješenja, jer je tada cijena izmjena najmanja, a utjecaj na troškove najveći [29]. Kroz daljnju razradu, tijekom izrade idejnog projekta, može se točnije procijeniti potrošnja betona i armature, i preciznije ocijeniti izabrana varijanta projektnog rješenja. Ako rješenje ne zadovoljava u vezi s vrijednostima ključnih parametara, nužno je razraditi druge varijante idejnog projekta. Nakon izrade glavnog projekta dobiveni su precizni podaci o potrošnji ključnih resursa, ali je do tada već prošlo dosta vremena i potrošena su značajna sredstva za izradu projektne dokumentacije, pa cijena izmjena nije više toliko niska kao na početku procesa projektiranja. Konačna ocjena projektnog rješenja sa stajališta troškova dobiva se nakon završetka glavnog projekta usporedbom planiranih i realiziranih vrijednosti ključnih parametara. Ako su zadovoljene predložene potrošnje ključnih resursa, investitor može pristupiti ugovaranju radova.

6.2. Primjena rezultata istraživanja – faza planiranja realizacije radova

U fazi planiranja realizacije radova izvođač nastoji što racionalnije organizirati svoje poslove, smanjiti troškove i rokove izgradnje. Takav pristup omogućava izvođaču nižu cijenu rada uz povećanje konkurentnosti na tržištu i ostvarivanje planirane stope profita. Planiranje realizacije radova izvođač provodi najprije pri davanju ponude, kako bi uzeo u obzir sve relevantne faktore koji mogu utjecati na cijenu i rok, a zatim detaljno prije početka izvođenja radova kako bi ostao u okvirima ugovorene cijene i roka gradnje. Da bi postigao nisku cijenu radova, izvođač treba raspolagati učinkovitim oplatnim sustavima (u istraživanju je primijenjena oplata Peri [19]), imati stručne i educirane radnike i ostvariti visoku produktivnost rada, imati kvalitetan kadar za izradu optimiziranih dinamičkih planova.

Kao mjera za ocjenu kvalitete dinamičkih planova, odnosno organizacije posla, predlaže se utrošak rada [2]. Na temelju

podataka dobivenih iz baze projekata njegova vrijednost se ograničava na 3,60 h/m², (tablica 3.). Navedene potrošnje vrijede za dominantnu vrstu gradnje stambenih objekata u Beogradu. Pri tome treba napraviti jasnu razliku između broja sati koji potječu iz projektnog rješenja i radnih sati koji proizlaze iz dinamičkog plana gde treba obračunati i eventualna čekanja, odnosno nezaposlenost radne snage. Ako je planirana potrošnja radne snage u navedenim okvirima izvođač može pristupiti realizaciji posla. U suprotnom, nužno je razmotriti nove opcije sa drugim oplatnim sustavima, drugom organizacijom posla i novim dinamičkim planom. Prilikom izbora oplatnog sustava, glavni kriterij za izvođače je nabavna cijena oplate ili cijena iznajmljivanja, broj ponovnih upotreba, kao i minimalno angažiranje radne snage. Pravilan izbor oplatnog sustava s jasno definiranim taktovima betoniranja povoljno utječe na formiranje organizacijskih tokova radne snage i eliminaciju neproizvodnog rada, zbog čega se mogu ostvariti značajne uštede [30 - 32]. Radi prevencije i izbjegavanja nepotrebnih troškova zbog nedovoljne kvalitete, nužno je primijeniti odgovarajuće sustave kvalitete tijekom izvođenja radova [33].

Kod izrade dinamičkih planova, predlaže se najprije razrada operativnih planova na razini etaža, a zatim objedinjavanje u ukupni plan realizacije radova. Cilj je takvog pristupa osigurati maksimalnu zaposlenost i sinkronizaciju radne snage. Za izradu operativnog plana mogu se primijeniti različiti sustavi planiranja, a u radu se predlaže upotreba sustava planiranja zasnovanog na ciklusima rada (eng. *Work Cycle Based Scheduling* - WCBS) [34] i sustava posljednjih planova (eng. *Last Planner System* - LPS) [35]. WCBS podrazumijeva izradu dnevnih planova s prikazom prostornog položaja radnih ekipa, izvršenom sinkronizacijom rada i provjerom zaposlenosti kapaciteta radnih ekipa na dnevnoj razini. LPS sustav se temelji na kontroli ispunjenosti preduvjeta za odvijanje aktivnosti [36] i usklađivanju tjednih operativnih planova posljednjih planera (osoba zadužena za kontrolu i završetak određenih zadataka na operativnom nivou [37]) na tjednim sastancima.

S obzirom na to da se operativni planovi tipske etaže mogu odrediti na različite načine, glavni uvjet jest taj da broj radnika na gradilištu ne varira i da se osigura maksimalna zaposlenost svake vrste radnika. Prednost imaju rješenja u kojima je postignuta veća zaposlenost radne snage.

7. Rasprava

Analiza prikazana u ovom radu temelji se na podacima koji su preuzeti iz građevinske tvrtke koja je objekte izvodila s vlastitom radnom snagom na području grada Beograda, koristeći pritom oplatu renomiranog proizvođača uz ostvarenje dobre kvalitete radova. Takav pristup primijenjen je kako bi se osigurala veća usporedivost podataka i lakše razmotrio izolirani utjecaj vrste konstrukcijskog sustava na cijenu i trajanje izgradnje armiranobetonske konstrukcije tipske etaže. To je ujedno omogućilo da se ostvare racionalne vrijednosti ključnih parametara koje, kao takve, mogu poslužiti drugim poduzećima

kao ciljne vrijednosti. Korištenje podataka samo jednog poduzeća utjecalo je i da se ostvare odlični statistički pokazatelji pouzdanosti rezultata. S druge strane postoji određena ograničenost analize u smislu da se ne može precizno ustanoviti jesu li kod regresijske analize prisutni utjecaji tvrtke ili utjecaji projekta. Zbog toga se za nastavak daljnjih istraživanja predlaže formiranje panela podataka (više tvrtki s više projekata u različitom vremenskom intervalu). To bi omogućilo promatranje utjecaja tvrtke (kvaliteta radne snage, razina organizacije posla itd.) i utjecaja projekta u vremenskom kontekstu (gdje bi se mogao promatrati i utjecaj tehnologija). Za nastavak daljnjih istraživanja također se predlaže ispitivanje rezultata na novom skupu objekata s drugih područja izvan Beograda, po mogućnosti s uključivanjem većeg broja varijabli, što bi pridonijelo istraživanju utjecaja različitih tržišta i unaprjeđenju prikazanih rezultata istraživanja.

8. Zaključak

U radu je prikazano istraživanje utjecaja konstrukcijskog sustava na troškove i trajanje gradnje armiranobetonske konstrukcije. Istraživanje je provedeno na uzorku od 28 stambenih objekata koji su izgrađeni u Beogradu i koji predstavljaju dominantnu vrstu gradnje na tom području. S obzirom na glavne ciljeve istraživanja i ostvarene rezultate, zaključeno je sljedeće:

- Izbor vrste konstrukcijskog sustava značajno utječe na trajanje i troškove građenja ab konstrukcije stambenih objekata. Kao najpovoljniji pokazao se skeletni konstrukcijski sustav, zatim mješoviti, dok je masivni sustav u oba pravca na posljednjem mjestu. Primjenom skeletnog sustava mogu se ostvariti uštede u odnosu na druge konstrukcijske sustave. Izmjerene uštede u troškovima iznose do 25 %, a u trajanju radova i do 50 %.
- Identificirani su ključni parametri koji najviše utječu na troškove i trajanje gradnje armiranobetonske konstrukcije. U tom smislu izdvojena je potrošnja betona, armature i rada po četvornom metru bruto površine, koji zajedno iznose približno 85 % svih promatranih troškova. Na temelju izračunanih vrijednosti ključnih parametara mogu se usporediti projektantska rješenja i izbor najpovoljnijeg.
- U radu su identificirane granične vrijednosti ključnih parametara do kojih se objekt može smatrati racionalnim. To omogućava izradu kvantificiranog projektnog zadatka, primjenu PBD-a, kao i mjerljivo upravljanje izradom projektne dokumentacije.
- Fazna primjena rezultata istraživanja u procesu projektiranja (od idejnog rješenja do glavnog projekta) omogućava donošenje ispravnih odluka u ranim fazama izrade projektne dokumentacije, kada je cijena izmjena najmanja, a utjecaj na troškove najveći.
- Rezultati istraživanja mogu se uspješno primijeniti za unaprjeđenje faze planiranja realizacije radova. Ocjenjivanje organizacije posla i kvalitete dinamičkih planova može se provesti usporedbom preporučene i planirane potrošnje radnih sati.

Primjenom dobivenih rezultata istraživanja i zaključaka u praksi, moguće je poboljšati kvalitetu projektne dokumentacije i planiranje, optimizirati troškove i povećati učinkovitost izvođenja radova. Sa stajališta investitora to pridonosi oblikovanju ekonomičnijeg budžeta za realizaciju projekta, a sa stajališta izvođača povećava se konkurentnost i osigurava veća dobit. Primjena rezultata istraživanja u praksi može pridonijeti unaprjeđenju koncepta upravljanja investicijskim projektima u domeni grubih građevinskih radova.

Prikazana metodologija istraživanja može se uspješno primijeniti u različitim sredinama i na različitim vrstama objekata, što bi omogućilo promatranje utjecaja lokalnih specifičnosti i vrsta gradnje na vrijednosti ključnih parametara, troškove i trajanje izrade armiranobetonske konstrukcije. S obzirom na važnost dobivenih rezultata, bilo bi korisno po istoj metodologiji provesti daljnja istraživanja za druge vrste radova i druge vrste objekata, kao i razmotriti te analizirati utjecaj pozitivnih izvođačkih iskustava na troškove i trajanje izrade armiranobetonske konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Popović, Ž.: Zgradarstvo, AGM knjiga, Beograd, 2007.
- [2] Dimitrijević, B.: Optimizacija uticaja konstruktivnog i oplatnog sistema na troškove i trajanje građenja stambeno-poslovnih objekata, disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2016.
- [3] Spekkink, D.: Performance Based Design of Buildings – PeBBu Domain 3 – Final Domain Report, Rotterdam, The Netherlands, October 2005.
- [4] Shehu, Z., Endut, I.R., Anintoye, A., Holt, G.: Cost overrun in the Malaysian construction industry projects: A deeper insight, *International Journal of Project Management*, 32 (2014), pp. 1471-1480, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.04.004>
- [5] Jin, R.Z., Cho, K.M., Hyuan, C.T., Son, M.J.: MRA-based revised CBR model for cost prediction in the early stage of construction projects, *Expert Systems with Applications*, 39 (2012), pp. 5214-5222, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.11.018>
- [6] Kim, G.H., An, S.H., Kang, K.I.: Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning, *Building and Environment*, 39 (2004), pp. 1235-1242, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.013>
- [7] Garcia De Soto, B., Adey, B.: Investigation of the case-based reasoning retrieval process to estimate resources in construction projects, *Procedia Engineering*, 123 (2015), pp. 169-181, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.074>
- [8] An, S.H., Kim, G.H., Kang, K.I.: A case-based reasoning cost estimating model using experience by analytic hierarchy process, *Building and Environment*, 42 (2007), pp. 2573-2579, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.007>
- [9] Liu, N.X., Zhao, X., Sun, H.H., Zheng, Y.M., Ding, J.M.: Structural Performance Assessment and Control of Super Tall Buildings During Construction, *Procedia Engineering*, 14 (2011), pp. 2503-2510, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.315>
- [10] Cha, Y.J., Agrawal, A., Philips, B., Spencer, B.: Direct performance-based design with 200 kN MR dampers using multi-objective cost effective optimization for steel MRFs, *Engineering Structures*, 71 (2014), pp. 60-72, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.023>
- [11] Wen, Y.K.: Reliability and performance-based design, *Structural Safety*, 23 (2001), pp. 407-428, [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00011-5)
- [12] Angusti, G., Ciampoli, M.: Performance-Based Design in risk assessment and reduction, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23 (2008), pp. 496-508, <https://doi.org/10.1016/j.proengmech.2008.01.007>
- [13] Mitropoulou, C., Lagaras, N., Papadrakakis, M.: Life-cycle cost assessment of optimally designed reinforced concrete buildings under seismic actions, *Reliability Engineering and System Safety*, 96 (2011), pp. 1311-1331, <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.04.002>
- [14] Chon, W.: Experience on implementing performance-based design in Hong Kong, *Procedia Engineering*, 62 (2013), pp. 28-35, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.041>
- [15] Aissani, A., Chateaufort, A., Fontaine, J.P., Andebert, P.: Cost model for optimum thicknesses of insulated walls considering indirect impacts and uncertainties, *Energy and Buildings*, 84 (2014), pp. 21-32, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.090>
- [16] Gandhi, B., Shah, B.J.: Performance Based Seismic Design of Reinforced Concrete Bridges, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1 (2012) 5.
- [17] Alexandris, A., Sitarenios, P.: Seismic design of a motorway embankment on improved ground: A performance based design approach, *Second international conference on performance based design in earthquake geotechnical engineering*, Paper No. 9.10, Taormina (Italy), May 28-30, 2012.
- [18] Stojadinović, Z.: Sistem upravljanja projektima izgradnje stambeno-poslovnih objekata na bazi integracije procesa projektovanja i građenja, disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2007.
- [19] Priručnik – Oplate, skele, inženjering, PERI GmbH i Peri Srbija, Beograd, 2014.
- [20] Koprivica, M.: Šumarska biometrija, Institut za šumarstvo, Beograd, 1997.
- [21] Dolaček-Alduk, Z., Radujković, M., Mikulić, D.: Model upravljanja troškovima kvalitete u građevinskim projektima, *Građevinar*, 61 (2009), pp. 147-156.
- [22] Matejević, B., Zlatanović, M.: Regresijski model za procjenu produktivnosti betoniranja armiranobetonskih ploča, *Građevinar*, 69 (2017) 7, pp. 561-572.
- [23] Statističke tablice: https://helpdesk.uniri.hr/system/resources/docs/000/001/778/original/Statisticke_tablice.pdf
- [24] Popović, J.: Unaprjeđenje metoda za procjenu napora softverskih projekata, disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2016.

- [25] Kocaguneli, E., Menzies T.: Software effort models should be assessed via leave-one-out validation, *Journal of Systems and Software*, 86 (2013) 7, pp. 1879-1890.
- [26] Shcherbakov, M.V., Brebels, A., Shcherbakova, N.L., Tyukov, A.N., Janovsky, T.A., Kamae, V.A.: A Survey of Forecast Error Measures, *World Applied Sciences Journal 24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society)*, pp.171-176, 2013.
- [27] Hyndman, R.J., Koehler, A.B.: Another look at measures of forecast accuracy, *International Journal of Forecasting*, 22 (2006) 4, pp. 679-688.
- [28] Ivković, B., Popović, Ž.: Upravljanje projektima u građevinarstvu, IP Nauka, Beograd, 1995.
- [29] Samy E. G. Elias: Value Engineering, A Powerful Productivity Tool, *Computers & Industrial Engineering*, 35 (1998) 3-4, pp. 381-393.
- [30] Arizanović, D., Petronijević, P., Beljaković, D.: Tehnologija građevinskih radova – grubi građevinski radovi, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2015.
- [31] Ivković, B., Arizanović, D.: Organizacija i tehnologija građevinskih radova, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu i Nauka, Beograd, 1990.
- [32] Kovačec, S., Štrukelj, A., Pšunder, M., Lončarić, R., Pšunder, I.: Izbor optimalne tehnologije građenja, *Građevinar*, 62 (2010) 8, pp. 697-705.
- [33] Ivanišević, N., Rakočević, M., Knežević, M., Rutešić, S., Stevanović, B.: Quality control of construction works on the structure of atlas capital center, "TTEM", 8 (2013) 4, pp. 1571- 1578.
- [34] Marinković, D., Stojadinović, Z., Ivanišević, N.: Dinamički planovi utemeljeni na ciklusima rada, *Građevinar*, 65 (2013) 11, pp. 993-1002.
- [35] Ballard, G.: The Last Planner System of production control, PhD thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, 2000.
- [36] Ballard, G.: Lookahead Planning: The Missing Link in Production Control, Proc. 5th Annual Conf. Int'l. Group for Lean Constr., Gold Coast, Australia, pp. 1-13., 1997.
- [37] Ballard, G.: The Last Planner, Spring Conference of the Northern California Construction Institute, Monterey, 1994.