

Primljen / Received: 22.5.2012.

Ispravljen / Corrected: 2.9.2012.

Prihvaćen / Accepted: 4.9.2012.

Dostupno online / Available online: 15.9.2012.

Model prognoziranja S-krivulja u ranim fazama građevinskih projekata

Autori:



Prof.dr. sc. **Nives Ostojić-Škomrlj**, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
nives.ostojic@gradst.hr



Prof.dr.sc. **Mladen Radujković**, dipl.ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mladenr@grad.hr

Prethodno priopćenje

Nives Ostojić-Škomrlj, Mladen Radujković

Model prognoziranja S-krivulja u ranim fazama građevinskih projekata

U radu je prikazan metodološki postupak kojim se definira način prognoziranja raspodjele troškova u vremenu za fazu izvršenja projekta pomoću troškovne S-krivulje za tri različita tipa građevina: visokogradnja, tuneli i autocesta. Primjenjena su tri različita pristupa, a rezultati sva tri pristupa i njihove integracije prikazani su u obliku regresijskih matematičkih izraza i odgovarajućih dijagrama. Predložena metodologija može se koristiti za prognoziranje troškovne dinamike građevinskih projekata u svim njihovim fazama, uključivo i najraniju fazu kada ne postoji dovoljno detaljnih podataka.

Ključne riječi:

planiranje izgradnje, visokogradnja, tuneli, autoceste, S-krivulja, regresijski modeli, prognoza dinamike troškova

Preliminary note

Nives Ostojić-Škomrlj, Mladen Radujković

S-curve modelling in early phases of construction projects

The methodological procedure for forecasting cost distribution over time is given for the project realization phase using cost s-curves for three different types of structures: building, tunnel, and motorway. Three different approaches are used, and their results are correlated and presented in form of mathematical regression expressions and appropriate diagrams. The proposed methodology can be used for cash flow forecasting during all phases of construction projects, specially in the earliest phase in which detailed information about the project is scarce.

Key words:

construction planning, building engineering, tunnels, motorways, S-curve, regression models, cost scheduling

Vorherige Mitteilung

Nives Ostojić-Škomrlj, Mladen Radujković

Prognosierungsmodell von S-Kurven in der Frühphase von Bauprojekten

In der Arbeit ist die methodologische Vorgehensweise dargestellt, mit welcher die Art der Prognose der Kostenverteilung in dem Zeitraum der Projektbeendigung mit Hilfe der S-Kostenkurve für drei verschiedene Bautypen definiert wird: Hochbau, Tunnels und Autobahn. Es wurden drei verschiedene Vorgangsweisen verwendet, deren Resultate untereinander integriert und in Form von regressiven mathematischen Ausdrücken sowie entsprechenden Diagrammen dargestellt wurden. Die vorgeschlagene Methodologie kann für die Prognose der Kostendynamik von Bauprojekten in all ihren Phasen, einschließlich ihrer Anfangsphase, in welcher es ungenügend detaillierte Angaben gibt, verwendet werden.

Schlüsselwörter:

Bauplanung, Hochbau, Tunnels, Autobahnen, S-Kurve, Regressionsmodelle, Prognose der Kostendynamik

1. Uvod

Istraživanje raspodjele troškova u vremenu kod građevinskih projekata predstavlja važnu temu za investitora i izvođača. Podatak o troškovima dobiva svoju punu vrijednost istom kada mu se pridruži podatak o vremenu troška. Poznato je da se u znatnom dijelu građevinskih projekata ugovara i troškovna dinamika koja proizlazi iz usklađenih i od strane investitora i izvođača odobrenih planova i troškovnika radova. To je važan podatak za sve sudionike u građevinskom projektu, te je stoga i predmet brojnih istraživanja. Dio istraživanja usmjeren je na traženje zakonitosti odnosa ovih varijabli tijekom raznih faza projekta, odnosno za određene vrste građevinskih projekata, pri čemu se traži teorijska kumulativna S-krivulja koja najbolje prikazuje standardnu raspodjelu troškova u vremenu. S-krivulja predstavlja kumulativni novčani tijekom određenom razdoblju, pri čemu je na apscisi prikazano vrijeme "t", a na ordinati troškovi "v". U ovom radu se detaljno istražuju mogućnosti modeliranja kumulativnih troškova faze izvršenja projekta u vremenu primjenom tri različita pristupa. Za odabrane vrste građevinskih projekata potrebno je identificirati utjecajne parametre i zakonitosti raspodjele u uvjetima različitih organizacijskih scenarija određenih specifičnostima izvršenja, odlukama naručitelja projekta, djelovanjem vanjskih i unutarnjih rizika i utjecajima projektne strukture. Poznato je da su svi ovi čimbenici bitno različiti od projekta do projekta što uzrokuje iznimno veliku kombinatoriku slučajeva koja se ne može pojedinačno razmatrati. Stoga je slučajnim izborom istraživanih projekata osigurana podloga koja daje rezultat u uvjetima izostanka ekstremnih utjecaja, tj. u standardnim uvjetima izvršenja. Troškovna dinamika u posebnim i ekstremnim utjecajima na izvršenje može biti predmet nastavka istraživanja po specifičnim situacijama, pri čemu se rezultati ovog istraživanja mogu koristiti kao temeljna podloga.

2. Metodički postupak, metode i plan istraživanja

Istraživanje zakonitosti raspodjele kumulativnih troškova u vremenu po izabranim skupinama građevinskih projekata

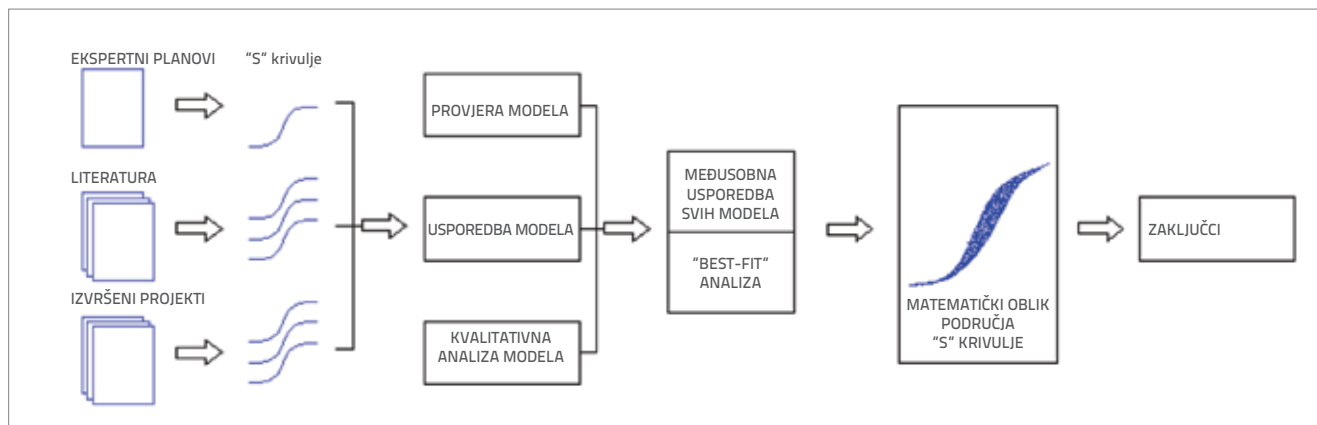
provedeno je modeliranjem S-krivulje radi određivanja teorijske krivulje koja na najprikladniji način prikazuje njihov odnos u standardnim uvjetima izvršenja projekta. Pri tome su se primjenila tri različita pristupa modeliranja (slika 1.) od kojih je svaki dao više alternativa krivulja uvjetovanih ranije definiranim organizacijskim utjecajima i parametrima. Ideja se sastoji u provedbi tri različita istraživačka pristupa i spoju njihovih rezultata kod izrade planirane troškovne S-krivulje za odabrane skupine građevinskih projekata. U svim do sada poznatim istraživanjima ovog problema rezultati su dobiveni primjenom samo jednog pristupa.

U prvom pristupu analizirali su se svi alternativni prijedlozi prikaza teorijskog odnosa troškovi-vrijeme po skupinama karakterističnih građevinskih projekata na temelju podataka pronađenih u svjetskoj i domačoj literaturi. Pregledom literature izabrani su rezultati istraživanja kojima se određuju troškovne krivulje po skupinama projekata na prvi način.

U drugom pristupu modeliranje se provelo kroz detaljnu analizu podataka o početno planiranom i stvarnom odnosu troškovi-vrijeme za izvršene građevinske projekata koji su razvrstani po karakterističnim skupinama. Usporedba "kako je bilo planirano" i "kako je izvršeno" dala je troškovne krivulje po istraživanim skupinama projekata na drugi način. U provedenim analizama došlo se i do spoznaja o specifičnim utjecajima koji mijenjaju geometriju troškovne krivulje.

U trećem pristupu modeliranje troškovi-vrijeme se provelo pomoću izrade standardiziranih mrežnih modela za normalne uvjete izvršenja po karakterističnim skupinama građevinskih projekata. Standardni mrežni planovi rezultat su rada planera-eksperata koji su temeljem iskustva iz prakse napravili uravnotežene planove s relativno ujednačenim profilima korištenja resursa, koji su rezultirali trećim načinom izrade troškovne krivulje.

Rezultati svakog pristupa prikazani su primjenom matematičkih izraza kumulativne distribucije troškova i pridruženom grafikom. U završnom dijelu istraživanja



Slika 1. Metodologija analize geometrije oblika S-krivulje

provedena je integracija rezultata tri pojedinačna pristupa po skupinama karakterističnih građevinskih projekata, te su tako dobivene konačne S-krivulje koje pokazuju zakonitosti dinamike troškova u vremenu u standardnim organizacijskim uvjetima. Rezultat modeliranja je troškovna dinamika koju se može primjenjivati u ranim fazama pripreme, kada nisu raspoloživi detaljni podaci o projektu.

Prognoziranje S-krivulje dio je višegodišnjih istraživanja koje se provodi u okviru znanstvenog projekta MZOŠ-a na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu [1]. Za potrebe istraživanja od 1996. godine kontinuirano se prikupljaju podaci o izvršenim građevinskim projektima: tip građevine, tehničke karakteristike, lokacija, organizacijski uvjeti izvršenja, vrsta ugovora, planovi, troškovnici, djelovanje rizika. Ukupna baza znanstvenog projekta sadrži podatke o više od tisuću izvršenih građevinskih projekata. Za ovaj dio istraživanja izdvojeni su podaci za 78 projekata – visokogradnji P+4, dionica autocesta bez objekata i tunela – izgrađenih tijekom posljednjih petnaestak godina, od kojih su 63 prikupljena za potrebe disertacije [2] izrađene u okviru znanstvenog projekta. Obrada podataka obavlja se nekim od standardnih računalnih programa statističke obrade i postupka "best fit". Pri modeliranju i analizi podataka, primjenjivale su se metode upravljanja projektom, organizacije građenja i metoda planiranja.

2.1. Teorijski modeli S-krivulje iz literature

Posljednjih desetljeća više je autora spoznalo važnost proučavanja troškovnih S-krivulja građevinskih projekata. Općenito uzevši, može se reći da su se proučavanja kretala u dva osnovna smjera, te su ovisno o tome razvijeni modeli svrstani u dvije kategorije. Prvu kategoriju čine nomotetski modeli, dok su u drugoj modeli idiografskog karaktera. Nomotetski modeli pokušavaju otkriti opće zakone i principe kod različitih tipova građevinskih projekata koji su grupirani

prema vrsti karakterističnih građevina, s osnovnom svrhom predviđanja tijekom S-krivulje.

S druge strane, idiografski modeli traže posebne zakonitosti koje se razlikuju za svaki individualni projekt. Ovakav pristup (Ashley i Teicholz, [3]) zahtijeva mnogo vremena i detaljnu analizu kako vremenske dimenzije projekta tako i one druge, financijske, koja mora biti vrlo detaljno i pažljivo pripremljena. S obzirom na sve navedeno, jasno je da krajnji korisnik zahtijeva jednostavniji i brži pristup, te idiografski modeli nisu naišli na veći odjek.

Dosadašnje studije i proučavanja standardiziranih krivulja troškova koriste podatke iz ranije izvedenih projekata koje su prije izveli Balkau, [4], Bromilow, [5]; Drake, [6]; Hudson, [7]; Tucker i Rahilly, [8]; Singh i Phua, [9]; Kenley i Wilson, [10]; Kaka i Price, [11]). Ovakav pristup izazvao je mnoge kritike koje se uglavnom odnose na pogreške u procjeni čak i među projektima unutar iste kategorije. Dostupnost detaljnim podacima i njihova kvaliteta ovisi o razini planiranja svakog projekta, tj. jesu li detaljni raspored i pojedinačne procjene dio plana ili nisu. Obično, međutim, detaljni podaci nisu dostupni, a njihova je kvaliteta i kvantiteta proporcionalna vremenu od početka realizacije. Ponekad, za neke projekte podaci uopće nisu dostupni. Zbog toga su izrađeni matematički modeli tako da svi projekti određene tvrtke mogu biti uključeni u prognozu novčanog toka tvrtke iako se o projektima zna vrlo malo podataka. Nekad su jedino dostupni podaci o tipu projekta (stambeni, poslovni, škola ili bolnica), način izgradnje (konvencionalna, industrijska, montažna itd.), trajanje projekta i ukupni troškovi.

Posljednjih godina više je autora pokušalo definirati matematički izraz dijagrama troškovi-vrijeme (tablica 1), što se pokazalo iznimno zahtjevnim zadatkom iz više razloga, pa "potraga" za univerzalnim rješenjem još uvijek nije dovršena. Tipični dijagram koji prikazuje kumulativni trošak/vrijeme građevinskog projekta ovdje je sveden na odnos $v = 100\%$ i

Tablica 1. Pregled razvijenih matematičkih modela za procjenu S-krivulje prema izvorima iz literature

Autor	Godina	Izraz
Bromilow	1978.	$Y = [a_0 + a_1(w/t) + a_2 (w/t)^2 + a_3 (w/t)^3 + a_4 (w/t)^4] C$
Hudson	1978.	$Y = S [x + C x^2 - Cx - (6x^3 - 9x^2 + 3x) K]$
Peer	1982.	$Y = 0,0089 + 0,26981 t + 2,36949 t^2 - 1,39030 t^3$
Tucker	1988.	$Y = \alpha (1 - e^{-(x-d)/\beta})$
Miskawi	1989.	$Y = 3^{1/2} \sin(\pi(1-t)/2) \sin(\pi t) \ln(t+0,5)/(a+t) - 2t^3 + 3t^2$
Boussabain i Elhag	1996.	za $0 \leq x \leq 1/3$ $Y = 9x^2 / 4$ za $1/3 \leq x \leq 2/3$ $Y = 3x/2 - 1/4$ za $2/3 \leq x \leq 1$ $Y = 9x/2 - 9x^2/4 - 5/4$

$t = 100\%$, oblikom je nalik slovu S pa stoga i naziv S-krivulja. Varijabla Y predstavlja kumulativni postotak sredstava uloženi u gradnju dok varijabla X predstavlja kumulativni postotak vremena potrebnoga u izvedbi gradnje. Na početku projekta kada se odvijaju mobilizacija i organizacija proizvodnih resursa, troškovi se akumuliraju polako. Kasnije, kada je angažirana većina resursa, trošak se akumulira velikim prirastom po približno konstantnoj stopi (relativno ravna linija u sredini prikaza). Kako se bliži završetak projekta, kada ekipe završe svoj posao, akumulacija troškova opada. Većina matematičkih modela se temelji na ovoj formulaciji.

U ovom istraživanju izdvojene su tri skupine građevinskih projekata:

- objekti visokogradnje
- tuneli
- dionice autoceste.

Osnovni zaključak do kojega se došlo pregledom literature i analizom predloženih matematičkih modela iz literature jest taj da su za prognoziranje troškovne dinamike građevinskih projekata visokogradnje, tunela i autocesta pogodni modeli Tuckera, Miskawia Boussabaina i Elhaga, te djelomično Hudsonov DHSS model koji je razvijen u British Department of Health and Social Security. U slučaju promatranja literaturnih krivulja u koordinatnom sustavu 100%/100%, fokus je na geometriji krivulje, pa se dobiveni rezultati mogu koristiti kao podloga i izvan okruženja gdje su nastali.

Ako se iz proučavane literature preuzmu sve pogodne krivulje po pojedinim istraživanim skupinama i primjenom metode najmanjih kvadrata izvrši njihova najbolja aproksimacija definiraju se krivulje kojima se opisuje prva zakonitost raspodjele za svaku grupu građevina. Matematički izrazi za svaku od S-krivulja prema obradi literature, ovisno o vrsti građevinskog projekta, jesu sljedeći [2]:

$$Y_{\text{visokogradnja}} = 0,00308724 + 0,29833094 x_1 + 0,01298652 x_1^2 + 0,00012448 x_1^3 - 0,00000260 x_1^4 + 0,00000001 x_1^5 \quad (1)$$

$$Y_{\text{tuneli}} = 0,0022540801 + 0,3013256588 x_1 + 0,0190451810 x_1^2 + 0,0000154346 x_1^3 - 0,0000022972 x_1^4 + 0,0000000093 x_1^5 \quad (2)$$

$$Y_{\text{dionice a.c.}} = 0,0022540801 + 0,3013256588 x_1 + 0,0190451810 x_1^2 + 0,0000154346 x_1^3 - 0,0000022972 x_1^4 + 0,0000000093 x_1^5 \quad (3)$$

2.2. Modeli S-krivulje izrađeni na temelju izvedenih projekata u Hrvatskoj

Za potrebe analiza u ovom istraživanju korišteni su podaci o 78 izvedenih građevina u Republici Hrvatskoj [1], a koji su se mogli svrstati u jednu od tri kategorije iz točke 2.1. U prvu kategoriju svrstani su podaci o projektima izgradnje građevina visokogradnje, katnosti P+4 (29 građevina). Drugu kategoriju čine podaci o projektima tunelogradnje (22 građevine), dok su

u trećoj kategoriji podaci o projektima niskogradnje, izgradnje dionica autoceste – samo trase, bez građevina (27 dionica autoceste). Projekti obuhvaćeni istraživanjem gradili su se tijekom posljednjih petnaestak godina do 2010., a glavni dio istraživanja proveden je pri izradi doktorske disertacije [2].

Podaci o projektima izgradnje prikupljali su se putem anketa te intervjuiranjem sudionika u građenju; izvođača radova, nadzornih inženjera i investitora. Ključni elementi kod prikupljanja podataka odnosili su se na:

- plan i dijelove troškovnika
- ugovorenu cijenu građenja
- ugovoreno vrijeme izgradnje
- stvarnu cijenu građenja
- stvarno vrijeme građenja
- uzroke prekoračenja cijene građenja
- uzroke prekoračenja vremena građenja
- mjesečne naplate izvedenih radova.

Uz osnovne podatke o objektima – vrsta objekta, vrijeme izgradnje, ugovoreni i stvarni troškovi izgradnje, ugovoreno i stvarno trajanje izgradnje; prikupljeni su i podaci o mjesečnim (situiranim) troškovima izvedbe, na temelju kojih se došlo do podataka za izradu stvarne krivulje troškovi-vrijeme svakog od izvedenih projekata. Kao što je i očekivano, pokazalo se da u većini slučajeva dolazi do odstupanja između planiranog i stvarnog vremena izvedbe, kao i između ugovorenih i stvarnih troškova građenja. Stoga su tijekom istraživanja prikupljeni podaci o utjecajima rizika i promjena. Za razvrstavanje i analizu rizika primijenjen je pristup iz prethodnih istraživanja [12, 13, 14]. Prikupljeni su podaci o izvorima rizika, pokretačima, utjecaju i posljedicama. Usporedbom početnih planova i stvarnog izvršenja, uz analize odstupanja i analize djelovanja pojedinih rizika u vremenu, određene su troškovne krivulje po pojedinim projektima. Varijanta s uključenim djelovanjima rizika opisuje stvarno stanje, uz napomenu da je analiza slučajeva pokazala da se primjenom boljeg upravljanja projektom moglo ublažiti djelovanje nekih rizika. Stoga se za svaki primjer projekta provela dodatna analiza pretpostavljenog alternativnog upravljanja projektom kojim se ublažuje djelovanje rizika i dobvene su alternativne troškovne krivulje koje uključuju subjektivne procjene autora članka.

Na temelju provedene regresijske analize uzorka (poglavlje 2.1.), matematički izrazi za S-krivulje izvedenih objekata (s djelovanjima rizika) mogu se prikazati na sljedeći način:

- za izvedene objekte visokogradnje, P+4

$$Y_{\text{P+4}} = -0,0337623726 + 0,4038721032 x_1 - 0,0073410793 x_1^2 + 0,0011063571 x_1^3 - 0,0000169230 x_1^4 + 0,0000000719 x_1^5 \quad (4)$$

- za izvedene tunele

$$Y_{\text{tuneli}} = -0,1374996879 + 0,7939777374 x_1 - 0,0251265572 x_1^2 + 0,0013158131 x_1^3 - 0,0000176112 x_1^4 + 0,0000000717 x_1^5 \quad (5)$$

- za izvedene dionice autoceste

$$Y_i^{\text{dionice a.c.}} = -0,1162250238 + 0,3217680288 x_i + 0,0653865104 x_i^2 - 0,0033289281 x_i^3 + 0,0000703337 x_i^4 - 0,0000006271 x_i^5 + 0,000000002 x_i^6 \quad (6)$$

Matematički izrazi za S-krivulje izvedenih objekata (s ublaženim djelovanjima rizika) mogu se prikazati na sljedeći način:

- za izvedene objekte visokogradnje, P+4

$$Y_i^{P+4} = -0,0208063363 + 0,3755043598 x_i - 0,0045063985 x_i^2 + 0,0008679441 x_i^3 - 0,0000126806 x_i^4 + 0,0000000506 x_i^5 \quad (7)$$

- za izvedene tunele

$$Y_i^{\text{tuneli}} = -0,1628419754 + 0,7232842752 x_i - 0,0179868217 x_i^2 + 0,006969348 x_i^3 - 0,0000073496 x_i^4 + 0,0000000236 x_i^5 \quad (8)$$

- za izvedene dionice autoceste, trasa bez objekata

$$Y_i^{\text{dionice a.c.}} = -0,1480284072 + 0,4323857594 x_i - 0,0728915853 x_i^2 - 0,0037707534 x_i^3 + 0,00000790817 x_i^4 - 0,0000000329 x_i^5 \quad (9)$$

2.3. Standardizirani modeli planova izrađeni od planera-eksperata

U uvodnom dijelu rada spomenuta je potreba za izradom standardiziranog teoretskog modela S-krivulje gdje planer-ekspert na temelju zadanih parametara (veličina objekta, troškovnik, tehnološko izvršenje radova) izrađuje dinamički plan izvođenja objekta te odgovarajuću S-krivulju. Postupak za izradu dinamičkog plana aktivnosti i financijskog dinamičkog plana isti je u sva tri slučaja (visokogradnja, tunel, dionica autoceste). Na temelju poznatih podataka o normativima, količinama rada za svaki od tri tipa istraživanih građevinskih projekata izrađen je standardni dinamički plan izvedbe prikazan gantogramom aktivnosti. Za navedene projekte izrađeni su troškovnici te su na temelju 5 ponuda definirane prosječne cijene radova. Integriranjem dinamičkog plana aktivnosti i cijena stavki iz troškovnika dobiveni su dinamički planovi troškova, odnosno teorijske S-krivulje za sva tri tipa građevina (apsolutne veličine vrijednosti "t" i "v" svedene su na skalu 100%/100% radi jednostavnijeg proračuna i mogućeg uspoređivanja). U standardiziranim planovima pretpostavlja se kompetentno upravljanje projektom pri izvršenju, što podrazumjeva i minimalno očekivano negativno djelovanje rizika u rasponu do najviše 0-5 % za vrijeme i 0 % za troškove. Dinamičkim i financijskim planovima izvođenja dobivene su sljedeće vrijednosti:

visokogradnja (P + 4)

- ukupno trajanje izvođenja radova: 455 dana,
- ukupni troškovi: 10 mil kuna,

- vrijednost kvartila: 1. kvartil (14,95 %), 2. kvartil (48,16 %) i 3. kvartil (82,28%);

tunel

- ukupno trajanje izvođenja radova: 304 dana,
- ukupni troškovi: 67 mil kuna,
- vrijednost kvartila: 1. kvartil (18,43 %), 2. kvartil (64,38 %) i 3. kvartil (90,33 %);

dionica autoceste (trasa, bez objekata)

- ukupno trajanje izvođenja radova: 456 dana,
- ukupni troškovi: 172 mil kuna,
- vrijednost kvartila: 1. kvartil (11,36 %), 2. kvartil (29,94 %) i 3. kvartil (71,75 %).

Na temelju provedene analize [2] matematičke izraze za S-krivulje izvedenih objekata moguće je prikazati kako slijedi:

- za standardizirani model izgradnje objekta visokogradnje, P+4 u statističkome smislu pokazala se najboljom logistička krivulja (S – krivulja) ovoga oblika:

$$Y_i^{P+4} = \frac{1}{\left[\frac{1}{101} + (0,612158 \times (0,919930)^x) \right]} \quad (10)$$

- za standardizirani model izgradnje tunela najbolje je rezultate dao regresijski polinom 5. reda.

$$Y_i^{\text{tuneli}} = 0,4336861615 - 0,7431149611 x_i + 0,0854180739 x_i^2 - 0,0012087464 x_i^3 + 0,0000064128 x_i^4 - 0,0000000113 x_i^5 \quad (11)$$

- za standardizirani model izgradnje dionice autoceste, trasa bez objekata, najbolje je rezultate dao regresijski polinom 6. reda.

$$Y_i^{\text{dionice a.c.}} = 0,2397713305 - 0,7117306856 x_i + 0,1250470242 x_i^2 - 0,0049603919 x_i^3 + 0,0000905844 x_i^4 - 0,0000007270 x_i^5 + 0,0000000021 x_i^6 \quad (12)$$

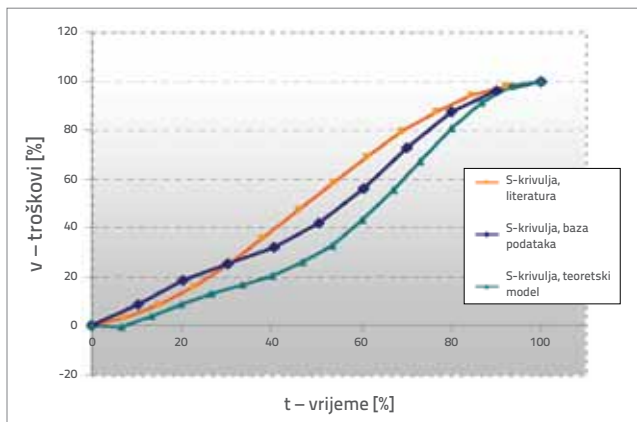
3. Integrirani postupak definiranja prognostičkih S-krivulja odnosa troškovi-vrijeme

Za potrebe modeliranja prognostičkih S-krivulja za različite tipove građevina (visokogradnja, tuneli, dionice autoceste) mogu se koristiti matematički izrazi za definiranje odnosa troškovi-trajanje. U ovom istraživanju rezultati su dobiveni primjenom integracije tri različita pristupa:

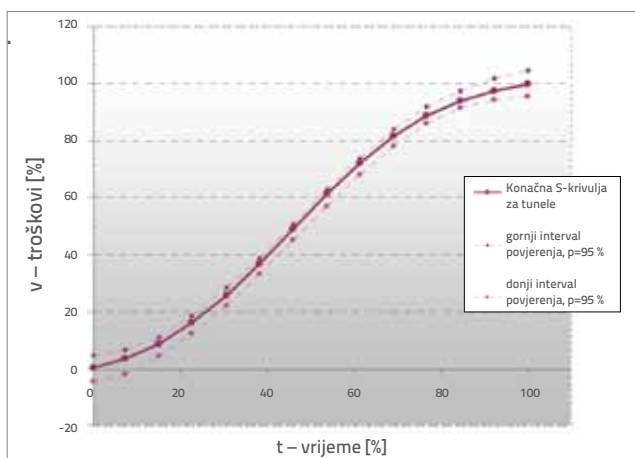
- u prvom pristupu modeli su definirani na temelju prijedloga za prikaz teorijskog odnosa troškovi-vrijeme prema raspoloživoj literaturi
- u drugom pristupu modeliranje se provelo kroz detaljnu analizu prikupljenih podataka početno planiranog i stvarnog odnosa troškovi-vrijeme za veći broj izvršenih građevinskih projekata

- u trećem pristupu modeliranje se provelo pomoću izrade standardiziranih modela za skupine projekata, čiji rezultati su standardizirane krivulje odnosa troškovi-vrijeme.

Da bi se definirale konačne prognostičke S-krivulje, potrebno je integrirati pojedinačne rezultate dobivene pomoću tri različita opisana pristupa (modele S-krivulja) za svaki od tri promatrana tipa objekata. U posljednjem koraku postupka integracije određuju se na temelju regresijske analize konačni modeli prognostičkih S-krivulja za svaki od tri tipa karakterističnih projekata. Na slikama 2. i 3. prikazan je primjer za tunele.



Slika 2. Usporedba modela S-krivulja za tunele



Slika 3. Prognostička S-krivulja za izvedbu tunela s intervalima povjerenja za p=95 %

U traženju rješenja uporabljeno je više statističkih paketa za obradu podataka, ponajviše SPSS i Statistica. Za svaki od tri tipa građevina grupiraju se po tri S-krivulje dobivene primjenom tri različita pristupa, kao baza za definiranje konačne prognostičke S-krivulje. Regresijskom analizom i metodom najmanjih kvadrata minimiziran je zbroj kvadrata odstupanja originalnih vrijednosti, te je na taj način određen najpovoljniji regresijski model. Najbolje je rezultate dao regresijski polinom 6. reda. U posljednjem koraku definirali su se intervali povjerenja za p=0,95 kao i odgovarajući modeli S-krivulja.

Matematički izrazi za standardizirane prognostičke S-krivulje, ovisno o vrsti građevinskog projekta, jesu sljedeći:

$$Y_i^{\text{visokogradnja}} = -0,0643212823 + 0,562316845 x_i - 0,0278540885 x_i^2 + 0,0016474856 x_i^3 - 0,000023498997 x_i^4 + 0,0000001165 x_i^5 - 0,0000000001 x_i^6 \quad (13)$$

Korigirani koeficijent determinacije iznosio je 0,968. Standardna pogreška procjene iznosi 1,02.

$$Y_i^{\text{tuneli}} = 0,0806494622 + 0,0216949007 x_i + 0,0388645143 x_i^2 - 0,0006037768 x_i^3 + 0,0000086493 x_i^4 - 0,0000000909 x_i^5 + 0,0000000004 x_i^6 \quad (14)$$

Korigirani koeficijent determinacije iznosio je 0,991. Standardna pogreška procjene iznosi 1,07.

$$Y_i^{\text{dionice a.c.}} = 0,0571888747 - 0,0645925803 x_i + 0,0756879341 x_i^2 - 0,0029910586 x_i^3 + 0,0000570109 x_i^4 - 0,0000004830 x_i^5 + 0,0000000015 x_i^6 \quad (15)$$

Korigirani koeficijent determinacije iznosio je 0,968. Standardna pogreška procjene iznosi 2,4.

4. Primjer proračuna S-krivulje

Rezultati mogućnosti primjene dobivenih spoznaja iz istraživanja testirani su na pet primjera svakog promatranog tipa građevine. U prilogu je jedan primjer proračuna prognostičke S-krivulje izgradnje objekta za sljedeće ulazne podatke (tablica 2):

- Vrsta objekta koji se gradi: visokogradnja (P+4), stambeno-poslovni objekt, ukupna bruto površina 4.200 m²,
- Procijenjeno trajanje izgradnje: 13 mjeseci
- Procijenjeni troškovi izgradnje: 24.676.320 kn
- Početak radova: 1. travanj

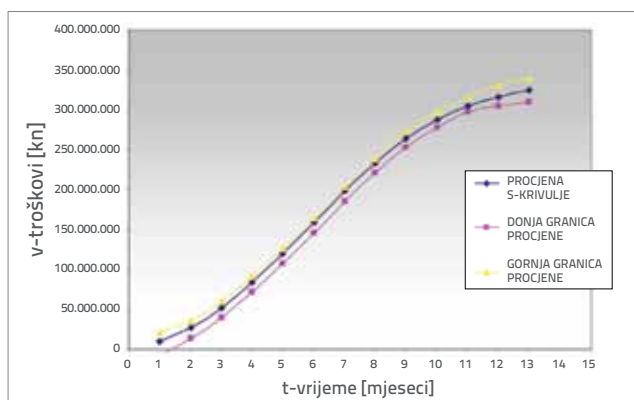
Tablica 2. Primjer proračuna prognostičke S-krivulje

Mjesec	Dani/mjesec	Kumulativno dana	Kumulativno dana [%]
15. travanj	15	15	3,79
1. svibanj	31	46	11,62
1. lipanj	30	76	19,19
1. srpanj	31	107	27,02
1. kolovoz	31	138	34,85
1. rujanj	30	168	42,42
1. listopad	31	199	50,25
1. studeni	30	229	57,83
1. prosinac	31	260	65,66
1. siječanj	31	291	73,48
1. veljača	28	319	80,56
1. ožujak	31	350	88,38
1. travanj	31	381	96,21
1. svibanj	15	396	100,00

Tablica 3. Prognostičke vrijednosti S-krivulje

Mjesec	Procjena S-krivulje	Donja granica procjene	Gornja granica procjene
15. travanj	432.034,71	-711.592,68	1.572.064,30
1. svibanj	1.206.154,36	69.864,29	2.341.022,70
1. lipanj	2.275.759,41	1.163.386,95	3.390.930,52
1. srpanj	4.044.816,74	2.928.859,20	5.163.409,57
1. kolovoz	6.541.022,28	5.432.585,76	7.648.907,67
1. rujan	9.506.437,62	8.398.668,01	10.611.709,18
1. listopad	12.865.766,73	11.754.706,02	13.976.597,05
1. studeni	16.087.754,63	14.984.630,17	17.197.351,37
1. prosinac	19.066.656,85	17.966.659,52	20.182.645,56
1. siječanj	21.431.438,65	20.327.950,76	22.560.751,31
1. veljača	22.922.298,69	21.827.744,32	24.053.146,53
1. ožujak	23.884.222,58	22.781.149,27	25.047.690,22
1. travanj	24.353.873,31	23.281.972,94	25.552.355,92
1. svibanj	24.651.643,68	23.451.941,28	25.815.139,20

U prvom koraku potrebno je pripremiti podatke za ulaznu varijablu x_t , odnosno svesti je na postotnu vrijednost u odnosu na ukupni broj raspoloživih dana. Korištenjem programskog paketa Statistica, za ulaznu varijablu X definirana je procijenjena vrijednost Y , te donja i gornja granica povjerenja. Kada te podatke prevedemo u apsolutne vrijednosti, primjenom rezultata istraživanja iz poglavlja 3. proračunavaju se stvarni iznosi prognostičke S-krivulje te iznose i donje i gornje granice procjene uz vjerojatnost od 95 % (tablica 3., slika 4.).



Slika 4. Grafički prikaz prognostičke troškovne S-krivulje na primjeru objekta visokogradnje

Provjera mogućnosti primjene rezultata istraživanja upućuje na jednostavnost postupka pri čemu se vrlo brzo može odrediti prognostička krivulja troškovne dinamike za fazu izvršenja određenog tipa građevinskog projekta.

5. Zaključak

Cilj ovoga istraživanja bio je definiranje prognostičkih S-krivulja za karakteristične tipove građevinskih projekata

pomoću kojih će se već u najranijoj fazi koncipiranja, a na temelju malog broja ulaznih podataka, moći izvesti simuliranje i prognoziranje dinamike ukupnih troškova za fazu izvršenja projekta. Istraživanje je provedeno u četiri koraka tijekom kojih su predložene S-krivulje po odabranim tipovima građevina na temelju pregleda svjetske i domaće literature, obrade baze podataka o izvršenim projektima te izrade planova od planera-eksperata. Integracijom navedena tri pristupa napravljen je prijedlog prognostičke S-krivulje troškovne dinamike u fazi izvršenja projekta za tri tipa građevine.

Najboljim prognostičkim modelom koji integrira rezultate tri opisana pristupa pokazala se u sva tri slučaja polinomna regresija šestog stupnja. Osnova predložene metodologije sastoji se u tome da se definira prognostički model procjene novčanog toka s najboljom procjenom, donjom granicom i gornjom granicom procjene. Gornji i donji limit pokazuju granice 95 % pouzdanosti okvira trajanja i troškova.

Rezultati istraživanja mogu se primijeniti za rano prognoziranje dinamike troškova za fazu izvršenja projekta. Primjenom predložene formule postupak je brz i jednostavan, a daje rezultat koji je u okvirima spoznaja koje proizlaze iz provedenih svjetskih istraživanja i domaće prakse. Korištenjem predložene metodologije mogu se napraviti modeli prognostičkih krivulja i za druge tipove građevina, pri čemu potencijalni korisnik treba ponoviti dio postupka uz korištenje vlastitih ulaznih podataka o izvedenim građevinama te angažiranjem vlastitih eksperata za izradu standardiziranih krivulja. Predložena metodologija prikazuje prognostičku troškovnu krivulju u dobrim do prosječnim uvjetima izvršenja. Neosporno je da slučajevi zastoja, iznimno velikih utjecaja rizika, loše organizacije radova, čestih promjena i slično bitno mijenjaju oblik prognostičke krivulje pri čemu svaki projekt dobiva specifičnu dinamiku predstavljenu S-krivuljom nepravilna oblika [14].

LITERATURA

- [1] Upravljanje rizikom i promjenama u projektno usmjerenom građevinskom poduzeću, Znanstveni projekt, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa RH, 2007-2012.
- [2] Ostojić Škomrlj, N.: Modeliranje S-krivulje troškova u fazi koncipiranja građevinskog projekta, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2005.
- [3] Ashley, D. B., Teicholz, P. M.: *Pre-Estimate Cash Flow Analysis*, Journal of the Constr. Div., Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 102 (1977) 3, pp. 369-379.
- [4] Balkau, R.: *Cost control*, International Journal of Project Management, 2 (1979), pp. 34-42.
- [5] Bromilow, F. I., Davies, V. F.: *Financial Planning and Control of Large Programs of Public Works*, Proceedings of the CIB W65 Second Symposium on Organisation and Management of Construction. Haifa, Israel, (1978), pp. 119-134.
- [6] Drake, B. E.: *A Mathematical Model for Expenditure Forecasting Post Contract*, Proceedings of the CIB W65 Second Symposium on Organisation and Management of Construction. Haifa, Israel, (1978), pp. 163-184.
- [7] Hudson, K. W.: *DHSS expenditure forecasting method*, Chartered Surveyor – Building and Quantity Surveying Quarterly, 5 (1978), pp. 42-55.
- [8] Tucker, S. N., Rahilly, M.: *A Construction Cash Flow Model*, Australian Institute of Building Papers, 3 (1988), pp. 87-99.
- [9] Singh, S., Pua, W. W.: *Cash Flow Trends for High Rise Building Projects*, Proceedings of the 4th International Symposium on Organisation and Management of Construction, Waterloo (Canada), (1984), pp. 841-854.
- [10] Kenley, R., Wilson, O.: *A Construction Project Cash Flow Model – An Ideographic Approach*, Construction Management and Economics, 4 (1986), pp. 213-232
- [11] Kaka, A. P., Price, A. D. F.: *Net Cashflow Models: Are They Reliable?*, Construction Management and Economics, 9 (1991), pp. 291-308
- [12] Radujković, M.: Upravljanje rizikom kod građevinskih projekata, Građevinar. 49 (1997), 5; pp. 247-255.
- [13] Radujković, M., Burcar, I., Nahod, M. M.: Effective Project Risk Knowledge Management, Transformation through Construction - Joint 2008 CIB W065/W055 Commissions Symposium Proceedings, Dubai, 2008. pp. 156-157.
- [14] Radujković, M. i suradnici: Planiranje i kontrola projekata, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2012.