

ASPEKTI OPTIMIZACIJE ŠEME GRADILIŠTA PRIMENOM GENETSKIH ALGORITAMA

Nenad Stojković¹

Rezime: U ovom radu je predstavljena u literaturi jedna od najrasprostranjenijih heurističkih metoda koje se primenjuju za rešavanje problema optimizacije šeme gradilišta – Genetski Algoritam (GA). Analizirani su glavni aspekti optimizacije primenom GA i izvršena sistematizacija bitnih faktora koji utiču na sam postupak optimizacije od kojih zavisi mogućnost primene algoritma na različite probleme iz prakse. On ujedno predstavlja sažeti pregled relevantnih istraživanja u oblasti optimizacije šeme gradilišta primenom GA.)

Ključne reči: šema gradilišta, optimizacija, genetski algoritam, heurističke metode

ASPECTS OF THE GENETIC ALGORITHM CONSTRUCTION SITE LAYOUT OPTIMIZATION

Abstract: This paper analyzes one of the most widespread heuristic methods applied to the optimization of the construction site layout - Genetic Algorithm (GA). The main aspects of optimization using GA were analyzed and the important factors that influence the optimization process, and on which the possibility of applying the algorithm to various problems from practice depends, were systematized. The paper also presents a brief overview of the relevant research in the field of site layout optimization using GA.

Key words: construction site layout, optimization, genetic algorithm, heuristic method

¹ Dr, Profesor strukovnih studija, Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija, nenad.stojkovic@akademijanis.edu.rs

1 UVOD

Konvencionalno rukovođenje građevinskim projektima podrazumeva rešavanje različitih problema odlučivanja u najvećoj meri zasnovano na iskustvu osoba odgovornih za upravljanje samim procesom izgradnje. Kod ovakvog pristupa, kvalitet odlučivanja zavisi i od kapaciteta odgovornog lica da sagleda i procesuiraju sve faktore koji utiču na odvijanje samog procesa, što sa porastom složenosti gradilišta postaje znatno teži zadatak. Savremeno građevinarstvo zahteva promenu načina razmišljanja ka takozvanom "pametnom pristupu" [1], [2]. Primenom računara mogu se obezbediti tačne i pouzdane procene i omogućiti donošenje odluka u upravljanju građenjem zasnovanih na obradi svih relevantnih informacija, naročito u pogledu upravljanja procesima koji se odvijaju na samom gradilištu [3], [4].

Planiranje šeme gradilišta je jedna od ključnih faza u procesu planiranja izgradnje koja podrazumeva pažljivo i strateško organizovanje i pozicioniranje privremenih objekata, opreme i građevinskih operacija kako bi se optimizovala produktivnost, bezbednost i efikasnost tokom celog projekta. Značaj planiranja šeme gradilišta ne sme biti zanemaren, jer direktno utiče na uspeh projekta. Ono se obično sprovodi kao optimizacioni problem kako bi se odredio optimalni raspored privremenih objekata (npr. smeštajnih prostora, gradilišnih kancelarija, zona za skladištenje materijala i njihove obrade) [5], odgovarajuće raspodele prostora za građevinsku opremu [6] i efikasnih planova za staze na gradilištu [7], uzimajući u obzir sva ograničenja gradilišta. Greške u ljudskim odlukama u ovom segmentu mogu dovesti do prekoračenja troškova, problema sa bezbednošću i kašnjenja [8], [9] i u velikoj meri umanjiti efikasnost projekta.

Sve veća izgrađenost utiče na ograničenje veličinu gradilišta [10]. Iz tog razloga često dolazi do gubitka vremena ili zastoja zbog sve kompleksnijih interakcija među različitim aktivnostima [11]. Ova ograničenja dodatno otežavaju optimizaciju šeme gradilišta [12]. Iako se šeme gradilišta mogu planirati na osnovu prethodnog iskustva, zbog kompleksnosti i velikog broja promenljivih koje treba uzeti u obzir primena računara i savremenih metoda programiranja se još od početka njihovog ubrzanog razvoja nameće kao najadekvatnije sredstvo optimizacije. Još 70-ih godina prošlog veka zabeleženi su prvi primeri rešavanja problema raspoređivanja privremenih objekata uz pomoć računara [13]. Nakon toga razvijani su različiti

modeli optimizacije, koji su primenjeni ili ih je moguće primeniti na problemu optimizacije šeme gradilišta. Iako imaju isti cilj – određivanje optimalnog rasporeda objekata na gradilištu – oni se po više aspekata razlikuju. U literaturi je dostupan veći broj istraživanja u kojima su autori na različite načine pristupali različitim problemima: načinu reprezentacije šeme gradilišta, generisanju inicijalnog rešenja, faktorima koji se uzimaju u obzir tokom optimizacije, ograničenjima vezanim za položaje pojedinačnih objekata i odnosima između objekata, metodi optimizacije šeme gradilišta, interpretaciji rešenja i dr. Ono što je zajedničko kod različitih istraživanja je da se u svim slučajevima težilo što bržem pronalaženju što boljeg rešenja. Važnost povećanja brzine rešavanja problema raste sa porastom broja objekata na gradilištu koje je neophodno rasporediti, što se može ilustrovati činjenicom da u slučaju od 10 različitih objekata i potencijalnih lokacija na gradilištu postoji 3628800 različitih rešenja [14]. Jedan od najznačajnijih faktora koji utiču na brzinu optimizacije predstavlja primenjeni optimizacioni postupak.

Značajan broj istraživanja u prošlosti je bio posvećen razvoju realističnih modela za optimizaciju planiranja šeme gradilišta. Primenjivane su različite tehnike koje generalno možemo svrstati u dve kategorije: metode matematičke optimizacije i heurističke metode [15]. Za razliku od matematičkih postupaka optimizacije, koji su osmišljeni da daju apsolutno optimalna rešenja, heurističkim metodama se dobijaju dovoljno dobra, ali ne i najoptimalnija rešenja. One se zasnivaju na stručnom znanju i iskustvu, a u poslednje vreme i na konceptima veštačke inteligencije. Najveći problem pristupa matematičke optimizacije leži u tome što sa porastom složenosti gradilišta opada mogućnost njihove primene zbog potrebe za izuzetno složenim proračunima. Stoga je druga kategorija jedini realno primenljiv pristup za optimizaciju kompleksnih projekata iz prakse.

U literaturi je dostupan veliki broj istraživanja primenom heurističkih metoda, između kojih postoje značajne razlike u posmatranju problema optimizacije, ali i matematičkoj, odnosno numeričkoj formulaciji istog. U ovom radu je predstavljena u literaturi jedna od najrasprostranjenijih heurističkih metoda koja se primenjuje za optimizaciju šeme gradilišta – Genetski Algoritam (GA). Analizirani su glavni aspekti optimizacije primenom GA i izvršena sistematizacija bitnih faktora koji utiču na sam postupak optimizacije, a od kojih zavisi mogućnost primene algoritma na različite aspekte uspešnosti projekta. On ujedno

predstavlja sažet pregled dostupnih istraživanja u oblasti optimizacije šeme gradilišta primenom GA.

2 GENETSKI ALGORITMI

Genetski algoritmi koriste nasumičnu, ali usmerenu pretragu kako bi pronašli globalno optimalno rešenje [16]. Pored toga, oni primenjuju inteligentnu pretragu za pronalaženje rešenja iz gotovo beskrajnog broja mogućih rešenja. Zasnovani su na Darwinovoj teoriji o postanku vrsta i prirodnoj evoluciji i Mendelovim zakonima koji su se pojavili krajem devetnaestog veka, a sam princip rada zasnovan je na biologiji – tačnije genetici [17]. Suštinski posmatrano, osnov za primenu principa genetskog nasleđivanja u optimizaciji šeme gradilišta jeste način predstavljanja problema raspoređivanja objekata na raspoloživom prostoru u okviru samog gradilišta. Naime, ako se svakom od n objekta dodeli jedna od n raspoloživih lokacija, uređen zapis njihovih položaja koji se formira u obliku niza podseća na genetski materijal – hromozom. Svaka uređena n -torka položaja objekata predstavlja jednu jedinku u ukupnoj populaciji mogućih rešenja, čiji je kvalitet neophodno iskazati. Za određivanje kvaliteta jedinke definiše se funkcija cilja, koja zavisi od konkretnog problema koji se rešava, odnosno cilja samog procesa optimizacije. Odabir strukture hromozoma i funkcije cilja predstavljaju prvi korak, nakon čega je moguće sprovesti sam postupak optimizacije, zasnovan na principima evolucije.

Populacija jedinki, odnosno određeni broj nasumično ili ciljano odabranih mogućih rešenja, predstavlja generaciju, iz koje se principom genetskog nasleđivanja formiraju sledeće generacije. Sam proces optimizacije predstavlja težnju da se iz generacije u generaciju poboljšava vrednost funkcije cilja svake jedinke, a samim tim i celokupne generacije. To se postiže ukrštanjem postojećih jedinki uz primenu tzv. genetskih operatora: operator selekcije, operator ukrštanja i operator mutacije.

Operator selekcije oponaša proces prirodne selekcije, pri čemu jedinke sa boljom vrednošću funkcije cilja dobijaju veću šansu za reprodukciju. Operator ukrštanja vrši ukrštanje hromozoma, tako što se od dve jedinke, roditelja, razmenom njihovih genetskih materijala dobijaju potomci sledeće generacije. Ovakvim ukrštanjem, uz simultanu primenu operatora selekcije i ukrštanja, dolazi se do uzastopnog gubitka genetskog materijala, što može dovesti do rešenja koje predstavlja samo lokalni optimum. To se može izbeći primenom operatora

mutacije, koji oponaša situaciju pojave „čudnog“ potomka za koga će se ispostaviti da je genije [15]. Ovakva jedinka u daljem procesu neće biti eliminisana, već će učestvovati u stvaranju narednih generacija, i samim tim odvesti rešenje od lokalnog optimuma. Postupak optimizacije se završava kada on konvergira ka određenom rešenju, za koje se smatra da je optimalno ili približno optimalno. To se manifestuje tako što se razlika vrednosti funkcije cilja uzastopnih generacija smanji do te mere da ona bude u okviru određene, unapred definisane granice.

U literaturi je prisutno dosta varijacija GA u oblasti optimizacije šeme gradilišta, ali njihov opšti oblik, predstavljen u vidu pseudokoda je sledeći [17], [18]:

Ulaz

Veličina populacije, n

Kriterijum zaustavljanja GA.

Izlaz

Globalno najbolje rešenje

Početak

Generisanje inicijalne populacije n hromozoma $Y_i(i=1,2,\dots,n)$.

Izračunavanje vrednosti funkcije cilja za svaki od hromozoma.

while not *kriterijum zaustavljanja*

Izbor para hromozoma inicijalne populacije zasnovan na vrednosti funkcije cilja.

Primena operatora selekcije.

Primena operatora ukrštanja.

Primena operatora mutacije.

Endwhile

Štampanje izlaznih podataka

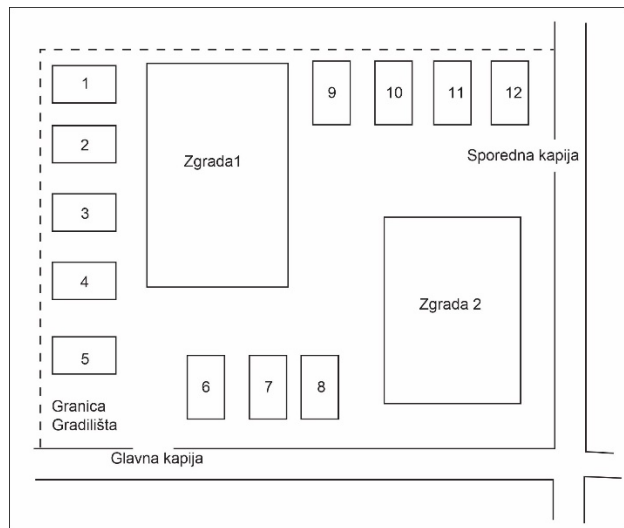
Kraj

3 MODELOVANJE PROSTORA

3.1 MODELOVANJE GRADILIŠTA

Optimizacija položaja objekata na gradilištu je zasnovana na kvantifikaciji određenih parametara i krajnjoj evaluaciji analiziranog rešenja, odnosno njegovom poređenju sa ostalim rešenjima. Kako na sam cilj optimizacije najčešće najveći uticaj problem transporta, odnosno pređenog puta, neophodno je definisati način na koji će rastojanje između objekata biti računato. U tom smislu, rastojanje između referentnih tačaka objekata u određenom koordinatnom sistemu jednostavno je naći. Međutim, problem dodeljivanja prostora objektima na gradilištu dodatno se komplikuje razmatranjem da li je konkretan objekat moguće postaviti na određenoj lokaciji. Da bi to bilo moguće analizirati, sam prostor

gradilišta mora biti predstavljen u određenom formatu. U literaturi je ovo pitanje tretirano na različite načine, koji se mogu razvrstati u tri različita sistema: sistem predodređenih lokacija, mrežni sistem i kontinualni sistem.

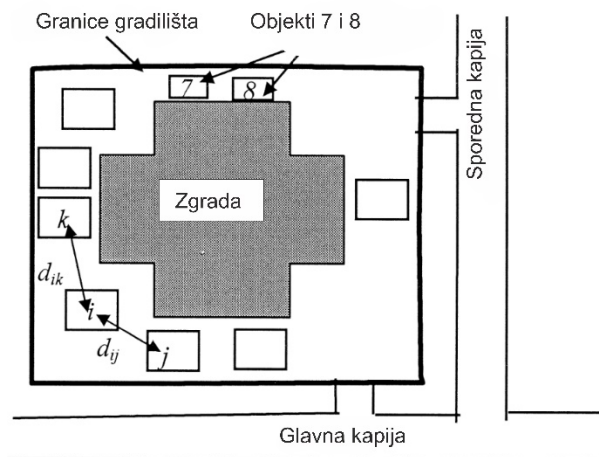


Slika 1 – Sistem predodređenih lokacija položaja – lokacije jednakih površina [19]

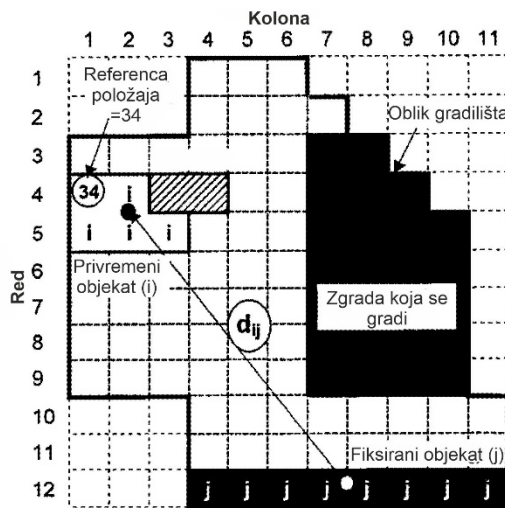
Sistem predodređenih lokacija predstavlja najjednostavniji pristup, i najčešće se može sresti u ranijim istraživanjima [14], [16], [19]–[21]. U suštini, on problem šeme gradilišta svodi na problem dodeljivanja objekata raspoloživim lokacijama. U tom smislu problem može biti sagledan na više nivoa kompleksnosti. Najjednostavniji vid problema podrazumeva da se svi objekti mogu postaviti na svakoj od raspoloživih lokacija (Slika 1). Kod složenijih problema, na određenim lokacijama mogu biti smešteni samo neki od objekata (Slika 2 – objekti 7 i 8), što se kao ograničenje mora uneti u algoritam optimizacije. Kompleksniji pristup donosi realnije sagledavanje problema, ali usložnjava problem optimizacije i povećava vreme potrebno za dobijanje rešenja.

U mrežnom sistemu prostor gradilišta je podeljen na jednake elementarne delove – ćelije (Slika 3), postavljene u ortogonalnu mrežu [22]–[25]. Predstavljen na ovaj način, čitav prostor gradilišta postaje raspoloživ za raspoređivanje objekata. Primena GA se u ovom pristupu odnosi na nejednak broj mogućih lokacija i objekata koje u njih treba smestiti. Kako se u procesu traženja rešenja objekti mogu postaviti i na mestima na kojima oni ne smeju biti, najčešće zbog neadekvatnosti njihovog položaja u odnosu na neki drugi objekat, ovaj pristup podrazumeva istovremenu primenu različitih tipova

ograničenja. I on može imati različit nivo kompleksnosti. U najjednostavnijem slučaju, u pojedinačnu ćeliju može biti smešten svaki od objekata. Veličina ćelije se u ovom slučaju definiše prema veličini najvećeg objekta. Složeniji slučajevi podrazumevaju da se objekat smešta u više ćelija, pri čemu on može imati nepravilan, različito orijentisan oblik. U složenijim slučajevima, referenciranje objekata se pridaje posebna pažnja, pri čemu oznaka njihovog položaja zavisi od položaja referentne tačke i samog oblika objekta. Primer koji ilustruje ovaj problem se može pronaći u [25].



Slika 2 – Sistem predodređenih lokacija položaja – pristup nejednakih površina [21]



Slika 3 – Predstavljanje prostora gradilišta mrežnim sistemom

Modelovanje gradilišta kao kontinualnog prostora (Slika 4) približava problem realnosti, ali u velikoj meri komplikuje proces traženja optimalnog rešenja. Stoga je često neophodno primeniti složenije

algoritme kako bi se prostorna ograničenja mogla adekvatno primeniti. Manji broj radova u kojima je prostor gradilišta posmatran kao kontinuum primenjuje GA za rešavanje problema optimizacije [26]–[28].

3.2 MODELOVANJE OBJEKATA

Pod objektima se u smislu modelovanja gradilišta smatra širi pojam od konvencionalnog shvatanja objekta. On predstavlja potrebu za zauzećem prostora u nekom vremenskom intervalu u bilo kom trenutku u toku trajanja projekta. Pod objektima se mogu smatrati privremeni objekti, prostori za skladištenje materijala, ali i pristupni putevi ili prostori u kojima će se u nekom trenutku odvijati određena aktivnost [29], a koji ne predstavljaju deo samog objekta koji se gradi. Pri tome treba imati na umu da se isti mogu smestiti i u okviru samog objekta koji se gradi, i kasnije se ukloniti, što je karakteristično za tzv. fazne ili dinamičke šeme gradilišta [12], [25], [30]. U privremene objekte spadaju kancelarije, privremeni liftovi, portirnice, i ostali objekti kojim se osoblje na gradilištu konstantno ili povremeno služi. Ostali zahtevi za obezbeđivanjem prostora su vezani za građevinsku mehanizaciju, skladištenje građevinskog materijala, odvijanje određenog radnog procesa (npr. armirački pogon), komunikaciju (pristupni i gradilišni putevi), kao i prirodne i druge prepreke (drveće, postojeći objekti koji se ne ruše i sl.).

Geometrija objekata može biti modelovana na različite načine: bez oblika, približnog oblika i tačnog oblika. Prvi pristup je karakterističan za modelovanje gradilišta sistemom predodređenih lokacija, jer isti ne zahteva podatak o geometriji objekta, već samo informaciju da li može biti smešten na određenoj lokaciji. Modelovanjem približne geometrije u obliku kvadrata ili pravougaonika [27], [31] moguće je izvršiti racionalnije raspoređivanje istih na gradilištu. Pri tome moguće je i uzeti u obzir i njihovu orijentaciju u prostoru [30], [32], što u prethodnom pristupu nije bio slučaj. Uzimanje u obzir tačnog oblika objekata može biti sprovedeno u dva stepena tačnosti. Prvi se vezuje za mrežni sistem prostora gradilišta, gde je objekat predstavljen pomoću nekoliko ćelija, i može imati nepravilan oblik [22], [33]. Sa druge strane, tačna predstava u okviru gradilišta modelovanog kao kontinualni prostor predstavlja veoma zahtevan problem, za čije se rešavanje se primenjuju kompleksniji algoritmi [34] i koji zahteva značajno više vremena za rešenje problema.

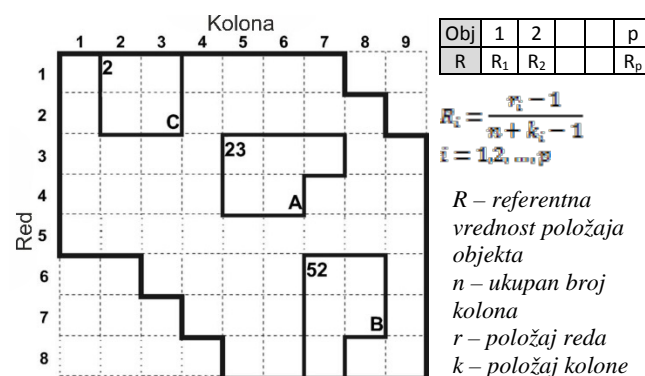
4 ASPEKTI OPTIMIZACIJE PRIMENOM GA

4.1 KODIRANJE HROMOZOMA

Polazna tačka za primenu GA pri optimizaciji šeme gradilišta je odabir kodiranja - načina na koji će rešenje biti predstavljeno (formata hromozoma). On zavisi od prirode problema i faktora koji se uzimaju u obzir prilikom optimizacije. U literaturi je prisutno više različitih tipova kodiranja, sumiranih u [18], kao što su binarno, oktavno, permutaciono, vrednosno i dr. Dva tipa kodiranja koji se najčešće sreću pri rešavanju problema optimizacije šeme gradilišta primenom GA su permutaciono i vrednosno. U ranijim radovima u ovoj oblasti, zbog svoje jednostavnosti, češće je primenjivano permutaciono kodiranje [16], [21]. Ono je pogodno za probleme raspoređivanja objekata u sistemu predodređenih lokacija (Tabela 1). Vrednosno kodiranje je karakteristično za slučajeve u kojima se u obzir uzima i geometrija objekata [15], [24], [31], [35]. Određenom funkcijom transformacije, položaj određenog objekta u unapred definisanom koordinatnom sistemu, njegov oblik i orijentacija se pretvaraju u određenu vrednost, za svaki od objekata (Slika 4). Od tih vrednosti se, po tačno definisanom redosledu, formira niz koji predstavlja jedan hromozom. Na tako formiranoj populaciji hromozoma se primenjuju operatori GA.

Tabela 1- Format permutacionog kodiranja [16]

Objekat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Lokacija	5	3	8	7	4	2	11	1	6	9	10

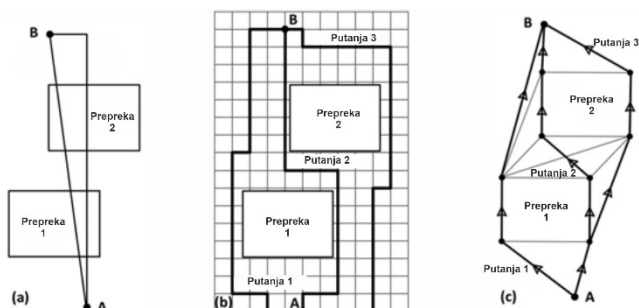


Slika 4 – Primer vrednosnog kodiranja [15]

4.2 ODREĐIVANJE NAJKRAĆE/OPTIMALNE PUTANJE IZMEĐU OBJEKATA

U građevinarstvu, sprovođenje aktivnosti zahteva različite resurse (radnu snagu, materijal i opremu),

koji se neprekidno kreću između različitih lokacija na gradilištu. Optimizacija šeme gradilišta se u najvećoj meri svodi na minimizaciju ukupnog pređenog puta. Pri tome se i ostali aspekti optimizacije najčešće svode takođe na problem pređenog puta uz primenu različitih težinskih faktora kojim se kvantifikuje kvalitet određene putanje u skladu sa odabranim kriterijumom. Za planiranje i optimizaciju građevinskih operacija, potrebno je identifikovati odgovarajuće položaje i adekvatne putanje između objekata na gradilištu. U literaturi je primenjeno nekoliko pristupa za određivanje putanja kretanja između dve tačke koji su detaljno sumirani u [36]–[38]. Ovi pristupi se mogu kategorisati u dve kategorije: pronalaženje najkraćeg puta; i pronalaženje optimalnog puta.



Slika 5 – Metode određivanja najkraćeg puta [38]

Najjednostavniji metod za pronalaženje najkraćeg puta između dva objekta je direktnim računanjem rastojanja pomoću koordinata njihovih referentnih tačaka, pri čemu se usvaja dijagonalno ili ortogonalno kretanje između njih (Slika 5a). Međutim ovaj pristup ne uzima u obzir eventualnu koliziju puta i okolnih objekata. To se može učiniti primenom složenijih metoda, kao što su mrežna metoda (Slika 5b) i metoda grafova vidljivosti (Slika 5c).

Pronalaženje optimalnog puta zahteva primenu složenih algoritama, kao dopunskih algoritmu optimizacije šeme gradilišta. Neki od najpoznatijih algoritama primenjenih u literaturi kao dopuna GA su Dijkstrin algoritam [39], A* algoritam [40] i dr.

Ovo je pitanje kome se skoro u svakom istraživanju u oblasti optimizacije šeme gradilišta pridavala posebna pažnja, pri čemu su se proračunu optimalnog puta, najčešće preko težinskih faktora, pridodavali drugi aspekti optimizacije, kao što su bezbednost [41], zaštitna životne sredine [15], troškovi transporta [41] i dr.

4.3 FUNKCIJA CILJA

Fukcija cilja predstavlja suštinu primene GA u svrhu optimizacije šeme gradilišta. Njome se kvantifikuje realna vrednost određene jedinice populacije, i predstavlja kriterijum optimizacije. To je aspekt u kome se implementira praktično iskustvo, jer nisu svi kriterijumi optimizacije realno merljivi. Neki od njih mogu da se kvantifikuju, ali ne mogu tačno da se predvide, već su stvar iskustvene procene. Drugi su kvalitativnog karaktera, i njihova primena zavisi od iskustva procenjivača, kako u pogledu procene njihovog kvalitativnog uticaja na organizaciju procesa gradnje, tako i u pogledu njihovog kvantitativnog uticaja na rešenje koje se dobija primenom GA. U najjednostavnijim primerima, funkcija cilja kao minimalna vrednost ukupnog pređenog puta za određenu šemu gradilišta bi mogla biti predstavljena jednačinom

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n w_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

gde je w_{ij} težinski faktor, npr. frekventnost komunikacije između objekata pod rednim brojem i i j [16], a d_{ij} dužina puta između njih. Ovaj proizvod se neretko naziva i ukupnom cenom komunikacije između objekata.

U nekim slučajevima je neophodno da dva objekta budu neposredno jedan uz drugi, kao npr. portirница i ulazna kapija. Čak i ako im je pozicija fiksirana, zbog svog odnosa sa drugim objektima oni ne mogu biti izuzeti iz proračuna. U tim slučajevima se funkcija cilja može modifikovati. To se uglavnom vrši ekstremno velikim težinskim faktorima, ali i uvođenjem faktora zasnovanih na više parametara. Primer za to je sledeći izraz [42]

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (2)$$

gde je C_{ij} indeks blizine koji uzima u obzir ukupan uticaj koji blizina dva objekta ima na odvijanje procesa građenja. U ovom slučaju x_{ik} i x_{jl} su binarne promenljive, vezane za kodiranje hromozoma, koje označavaju da se objekat i nalazi na lokaciji k a objekat j na lokaciji l . U literaturi se za vrednosti indeksa blizine mogu pronaći preporuke zasnovane na kvalitativnom ocenjivanju važnosti međusobne blizine dva objekta [15], [25], prikazane u tabeli 2.

Tabela 2 – Konvencionalne vrednosti indeksa blizine

Kvalitativna ocena	Indeks blizine	
	[15]	[25]
Apsolutno neophodno	7776	10 ⁵
Izuzetno važno	1296	10 ⁴
Važno	216	10 ³
Normalne važnosti	36	10 ²
Nevažno	6	10 ¹
Nepoželjno	1	10 ⁰

Sama funkcija cilj, predstavlja jedan od najraznovrsnijih aspekata optimizacije šeme gradilišta primenom GA. Same formulacije modela se često u manjoj ili većoj meri razlikuju. U novije vreme, one se usložnjavaju sa ciljem da podrže proces višekriterijumske optimizacije. Karakteristični primeri funkcija cilja sistematizovani su u [38] i prikazani u tabeli 3.

Kako se u tabeli 3 može videti, funkcija cilja u najvećoj meri zavisi direktno od težinski faktorisanih rastojanja između objekata. Međutim, u nekim istraživanjima je ukazano da ovaj pristup ima svoje nedostatke [43], [44]. Naime, vrednost težinskog faktora može jedino uticati na cenu unutrašnjeg transporta ili ostale pokazatelje koji se mogu direktno povezati sa pređenim putem između dve lokacije. Međutim, na ovaj način se zanemaruje uticaj rastojanja na efikasnost samog projekta – kašnjenje u dopremanju materijala bezbednosne rizike ukrštanja određenih puteva i sl. – što pogotovo može biti izraženo kod projekata koji sadrže aktivnosti promenljive dinamike. Takođe, ovaj pristup analizira samo rastojanja između objekata, zanemarujući uticaj njihove veličine na produktivnost i ekonomičnost projekta. Naime, povećanje veličine objekata kao što su privremena skladišta materijala može imati uticaj na ostale objekte na gradilištu, ali i na troškove eksternog skladištenja materijala, dodatno vreme dopremanja istog i sl. Takođe, u realnosti, određeni efekat rastojanja između dva objekta, izražen kroz težinske faktore ne može uzeti u obzir prestanak njegovog uticaja za rastojanja veća od graničnih. Ovo je karakteristično za promenu uticaja udaljenosti od kрана na opasnost od padajućih objekata. U [43], autori su ovaj nedostatak nadomestili uvođenjem višekriterijumske optimizacije primenom GA pri čemu su posebno računali vrednost funkcije cilja sa aspekta funkcionalnost i aspekta koštanja projekta, kao i njihov odnos.

Tabela 3 – Formulacije f-je cilja GA optimizacije [38]

Ref.	Funkcija cilja	Napomena
[45]	$\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n W_{ij} d_{ij}$	d – rastojanje između objekata W – težinski faktor
[46]	$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij}$	f – intenzitet komunikacije između objekata d – rastojanje između objekata
[38]	$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} R_{ij}$	R_{ij} – indeks blizine d – rastojanje između objekata
[20]	$\sum_j \sum_k T Q_{jk} C_{jk}$	T – vreme puta kuke Q – količina prenosa materijala C – jed. cena prenosa materijala
[47]	$\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q T C L_{mkij}$	TCL – ukupna cena transporta materijala
[34]	$\sum_{i=2}^n \sum_{j=i-1}^{n-1} D_{ij} W_{ij} + P_c + P_s + P_a + \sum_{i=1}^n R C_i$	D_{ij} – rastojanje W_{ij} – indeks blizine $P_{c,s,z,bz}$ – kazneni poeni za povredu prostora $R C_i$ – troškovi relokacije
[48]	$w_1 f_1 + w_2 f_2$	f_1 – ukupna cena f_2 – komponenta bezbednosti i zaštite životne sredine $w_{1,2}$ – težinski faktori u vezi sa f_1 i f_2

U literaturi su težinske funkcije često korišćene za formulaciju ograničenja (constraints) [34], [35], [43].

Pri tome su uvek razvrstavana u dve kategorije: meka i tvrda ograničenja. U tvrda ograničenja spadaju ona koja moraju biti zadovoljena po svaku cenu. Ukoliko nisu zadovoljena, analizirano rešenje se smatra neizvodljivim. Primer za to je ograničenje da položaj i orijentacija objekata moraju biti takvi da su oni celom svojom površinom smešteni unutar granica gradilišta, kao i da se ne preklapaju. Sa druge strane, meka ograničenja mogu biti zadovoljena do određene mere. Tu spadaju ograničenja vezana za udaljenost dva objekta, veličinu objekata i tzv. isključujuća ograničenja. Isključujuća ograničenja su zapravo binarnog karaktera i ona predstavljaju situacije kada nakon određene granice (npr. udaljenosti ili blizine dva objekta) položaj određenog objekta prestaje da ima uticaj na vrednost funkcije cilja.

4.4 VREMENSKA DIMENZIJA

U toku realizacije projekta sa protokom vremena se mogu menjati potrebe za vrstom radova i karakteristikama prostora u kome će se on, kao i prateće aktivnosti povezane sa njim, odvijati. Tako, optimalna šema gradilišta u jednoj fazi projekta može predstavljati neadekvatno rešenje za drugu fazu. Sa druge strane, u realnosti se ne može implementirati različita optimalna šema za svaku od faza projekta. Za to bi bilo neophodno vršiti kompletnu reorganizaciju prostora, što iziskuje dodatne troškove i vreme, i utiče na efikasnost i ekonomičnost samog projekta. Zbog toga je ove promene poželjno uzeti u obzir u samom postupku optimizacije. To podrazumeva određivanje optimalnog položaja objekata uzimajući u obzir sve faze, kao i uticaj premeštanja objekata kako na troškove, tako i na druge aspekte organizacije procesa izgradnje.

U dosadašnjim istraživanjima se u okviru optimizacije šeme gradilišta primenom GA mogu izdvojiti tri različita pristupa ovom problemu: statički, fazni i dinamički. Detaljna razmatranja o ovim pristupima se mogu pronaći u [36].

Najjednostavnije, statičko planiranje ne uzima u obzir promene koje se tokom vremena dešavaju u realizaciji projekta. Ovakav pristup može biti opravdan u slučajevima kada u toku realizacije projekta nema mnogo promena, a ima dosta raspoloživog prostora [7]. U realnosti ovo često nije slučaj, pogotovo u projektima koji se realizuju u gusto naseljenim područjima, gde je površina gradilišta često mala u odnosu na površinu objekta koji se gradi.

U faznom pristupu [33], [41], [49], realizacija projekta izgradnje se deli na više faza. Faze su poredane hronološkim redom. Objekti čije je

postojanje neophodno u više faza se prenose iz prethodne faze u narednu sa fiksnim položajem, pri čemu je moguće predvideti i njihovo premeštanje sa promenom faze. Ovaj pristup predstavlja značajan napredak u odnosu na statičko planiranje. Međutim, fazno planiranje podrazumeva da su svi objekti prisutni sve vreme trajanja jedne faze, što u realnosti ne mora biti slučaj. Vremenski intervali u kojima je postojanje određenih objekata neophodno se u realnosti preklapaju nepravilnije, što može iziskivati detaljnije planiranje vremenskog zauzeća prostora od faznog pristupa – dinamičko planiranje.

U dinamičkom pristupu, vreme postojanja određenog objekta na određenom prostoru se uzima realno, nezavisno od faze realizacije projekta. Nakon prestanka potrebe za tim objektom, prostor ostaje slobodan za smeštanje drugih objekata. Za razliku od fazne optimizacije, u dinamičkom pristupu se optimizacija vrši za ceo period trajanja projekta, uzimajući u obzir promene koje nastaju u toku vremena. U dostupnoj literaturi ima vrlo malo istraživanja u kojima je implementirano dinamičko planiranje primenom metoda GA, i ova oblast predstavlja značajan prostor za sprovođenje daljih istraživanja.

5 ZAKLJUČAK

Zbog velikog broja faktora od kojih zavisi proces izgradnje objekata u građevinarstvu, postojeći modeli optimizacije šeme gradilišta značajno se razlikuju po osnovnim pretpostavkama, a samim tim i po mogućnostima njihove primene. Širok spektar pretpostavki i promenljivih u dostupnim modelima čini sprovedene komparativne analize među njima gotovo nemogućom misijom. U ovom radu su predstavljeni najznačajniji aspekti optimizacije šeme gradilišta primenom genetskih algoritama. Iako je i u ovoj oblasti dostupan veliki broj istraživanja koja na različite načine pristupaju problemu optimizacije, uočeni su zajednički elementi koji su analizirani uz ukazivanje na relevantne primere iz literature. Odabrana istraživanja koja ilustruju analizirane aspekte ne predstavljaju detaljni pregled literature, što nije bio cilj ovog rada, već reprezentativne izvore u kojima se mogu pronaći detaljnije analize i razmatranja kao osnova za primenu GA u cilju optimizacije šeme gradilišta i dalji razvoj u ovoj oblasti. Ukazano je na prednosti i nedostatke određenih pristupa primenjivanih na različite ciljeve optimizacije. Pri tome, istaknuta je univerzalnost

određenih parametara koji mogu biti primenjeni na različite probleme optimizacije.

Ono što se takođe može primetiti u dostupnim istraživanjima je da svaki od primenjenih modela implementira određena pojednostavljena, dok se u pojedinim aspektima koncentrišu na detalje koji veoma realno predstavljaju probleme iz prakse. Imajući to u vidu, kao i činjenicu da praktična primena razvijenih modela GA, kao najznačajnijih u oblasti optimizacije šeme gradilišta još uvek nije našla masovnu primenu u praksi, u budućnosti se može očekivati značajan razvoj u ovoj oblasti.

LITERATURA

- [1] Wang Q., Tan Y., Mei Z.: **Computational Methods of Acquisition and Processing of 3D Point Cloud Data for Construction Applications.** *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 479–499, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09320-4.
- [2] Niu Y., Lu W., Chen K., Huang G.G., Anumba C.: **Smart Construction Objects.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 30, no. 4, Jul. 2016, doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000550.
- [3] Kim C., Park T., Lim H., Kim H.: **On-site construction management using mobile computing technology.** *Autom Constr*, vol. 35, pp. 415–423, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2013.05.027.
- [4] Rohani M., Shafabakhsh G., Haddad A., Asnaashari E.: **Strategy management of construction workspaces by conflict resolution algorithm and visualization model.** *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 25, no. 8, pp. 1053–1074, Sep. 2018, doi: 10.1108/ECAM-08-2016-0183.
- [5] Easa S.M., Asce M., Hossain K.M.A.: **New Mathematical Optimization Model for Construction Site Layout.** *J Constr Eng Manag*, vol. 134, no. 8, pp. 653–662, 2008, doi: 10.1061/ASCE0733-93642008134:8653.
- [6] Hammad A. W. A., Rey D., Akbarnezhad A.: **A mixed-integer nonlinear programming model for minimising construction site noise levels through site layout optimisation.** in *31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining, ISARC 2014 - Proceedings*, University of Technology Sydney, 2014, pp. 722–729. doi: 10.22260/isarc2014/0098.
- [7] Sadeghpour F., Andayesh M.: **The constructs of site layout modeling: An overview.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 199–212, Jan. 2015, doi: 10.1139/cjce-2014-0303.
- [8] Liao T. W., Egbelu P. J., Sarker B. R., Leu S.S.: **Metaheuristics for project and construction management - A state-of-the-art review.** *Autom Constr*, vol. 20, no. 5, pp. 491–505, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.autcon.2010.12.006.
- [9] Vilventhan A., Kalidindi S.N.: **Interrelationships of factors causing delays in the relocation of utilities: A cognitive mapping approach.** *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 23, no. 3, pp. 349–368, May 2016, doi: 10.1108/ECAM-10-2014-0127.
- [10] Kumar S.S., Cheng J.C.P.: **A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites.** *Autom Constr*, vol. 59, pp. 24–37, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.07.008.
- [11] Song X., Xu J., Shen C., Peña-Mora F.: **Conflicts resolution based construction temporary facilities layout planning in large-scale construction projects.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 43, no. 9, pp. 783–801, May 2016, doi: 10.1139/cjce-2015-0144.
- [12] Cheng M-Y., Chang N.W.: **Dynamic construction material layout planning optimization model by integrating 4D BIM.** *Eng Comput*, vol. 35, no. 2, pp. 703–720, Apr. 2019, doi: 10.1007/s00366-018-0628-0.
- [13] Moore J.M.: **Facilities Design with Graph Theory and Strings.** *The International Journal of Management Science*, vol. 4, no. 2, pp. 193–203, 1976.
- [14] Yeh I.-C.: **Construction-Site Layout Using Annealed Neural Network.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 201–208, 1995.
- [15] Sanad H.M., Ammar M.A., Ibrahim M.E.: **Optimal Construction Site Layout Considering Safety and Environmental Aspects.** *J Constr Eng Manag*, vol. 134, no. 7, pp. 536–544, 2008, doi: 10.1061/ASCE0733-93642008134:7536.
- [16] Li H., Love P.E.D.: **Site-level facilities layout using genetic algorithms.** *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 12, pp. 227–231, 1998.
- [17] Barović D.: **Oblikovanje i pozicioniranje objekta primenom numeričke optimizacije u cilju poboljšanja njegovih performansi u kontekstu energetske efikasnosti.** *Doktorska disertacija*, Univerzitet "Union - Nikola Tesla," 2018.
- [18] Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V.: **A review on genetic algorithm: past, present, and future.** *Multimed Tools Appl*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- [19] Mawdesley M.J., Al-Jibouri S.H.: **Proposed genetic algorithms for construction site layout.** *Eng Appl Artif Intell*, vol. 16, no. 5–6, pp. 501–509, Aug. 2003, doi: 10.1016/j.engappai.2003.09.002.
- [20] Tam C. M., Tong T. K. L., Chan W. K. W.: **Genetic Algorithm for Optimizing Supply Locations around Tower Crane.** *Journal of*

- Construction Engineering and Management*, vol. 127, no. 4, pp. 315–321, 2001.
- [21] Li H., Love P.E.D.: **Genetic search for solving construction site-level unequal-area facility layout problems**. 2000. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/autcon
- [22] Hegazy T., Elbeltagi E.: **EvoSite: Evolution-Based Model for its layout planning**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 198–206, 1999.
- [23] Elbeltagi E.: **Simplified spreadsheet solutions: A model for site layout planning**. *Cost Engineering*, vol. 42, no. 1, pp. 24–30, 2000 [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/291768736>
- [24] Osman H.M., Georgy M.E., Ibrahim M.E.: **A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms**. in *Automation in Construction*, Nov. 2003, pp. 749–764. doi: 10.1016/S0926-5805(03)00058-X.
- [25] Elbeltagi E., Asce M., Hegazy T., Eldosouky A.: **Dynamic Layout of Construction Temporary Facilities Considering Safety**. *J Constr Eng Manag*, vol. 130, no. 4, pp. 534–541, 2004, doi: 10.1061/ASCE0733-93642004130:4534.
- [26] Zouein P.P., Asce A.M., Harmanani H., Hajar A.: **Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 143–151, 2002, doi: 10.1061/ASCE0887-3801200216:2143.
- [27] El-Rayes K., Asce M., Khalafallah A.: **Trade-off between Safety and Cost in Planning Construction Site Layouts**. *Journal of Construction Engineering*, vol. 131, no. 11, pp. 1186–1195, 2005, doi: 10.1061/ASCE0733-93642005131:111186.
- [28] Khalafallah A., Hyari K.H.: **Optimization Parameter Variation: Improving Biobjective Optimization of Temporary Facility Planning**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 32, no. 5, Sep. 2018, doi: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000780.
- [29] Mawdesley M.J., Saad, Al-Jibouri H., Yang H.: **Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning**. *J Constr Eng Manag*, vol. 128, no. 5, pp. 418–426, 2002, doi: 10.1061/ASCE0733-93642002128:5418.
- [30] Said H., El-Rayes K.: **Performance of global optimization models for dynamic site layout planning of construction projects**. *Autom Constr*, vol. 36, pp. 71–78, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2013.08.008.
- [31] Duong C., Peansupap V.: **A Development of Optimization Model for Construction Site Layout Planning Using Genetic Algorithm**. in *Proceedings of The 28th National Convention on Civil Engineering*, 2023, p. CEM30/1-CEM30/9.
- [32] El-Rayes K., Asce M., Said H.: **Dynamic Site Layout Planning Using Approximate Dynamic Programming**. *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 119–127, 2009, doi: 10.1061/ASCE0887-3801200923:2119.
- [33] Elbeltagi E., Hegazy T., Hosny A. H., Eldosouky A.: **Schedule-dependent evolution of site layout planning**. *Construction Management and Economics*, vol. 19, no. 7, pp. 689–697, Nov. 2001, doi: 10.1080/01446190110066713.
- [34] Abotaleb I., Nassar K., Hosny O.: **Layout optimization of construction site facilities with dynamic freeform geometric representations**. *Autom Constr*, vol. 66, pp. 15–28, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.02.007.
- [35] Zhou F., AbouRizk S.M., AL-Battaineh H.: **Optimisation of construction site layout using a hybrid simulation-based system**. *Simul Model Pract Theory*, vol. 17, no. 2, pp. 348–363, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.simpat.2008.09.011.
- [36] Andayesh M., Sadeghpour F.: **A comparative study of different approaches for finding the shortest path on construction sites**. in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 33–41. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.526.
- [37] Rahman M.M., Bobadilla L., Mostafavi A., Carmenate T., Zanolongo S.A.: **An Automated Methodology for Worker Path Generation and Safety Assessment in Construction Projects**. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 479–491, Apr. 2018, doi: 10.1109/TASE.2016.2628898.
- [38] Binhomaid O.S.: **Construction Site-Layout Optimization Considering Workers' Behaviors Around Site Obstacles, Using Agent-Based Simulation**. PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, 2019.
- [39] El Meouche R., Abunemeh M., Hijaze I., Mebarki A., Shahrour, I.: **Developing Optimal Paths for Evacuating Risky Construction Sites**. *J Constr Eng Manag*, vol. 144, no. 2, Feb. 2018, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001413.
- [40] ElNimr A., Fagiar M., Mohamed Y.: **Two-way integration of 3D visualization and discrete event simulation for modeling mobile crane movement under dynamically changing site layout**. *Autom Constr*, vol. 68, pp. 235–248, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.05.013.
- [41] Jaafar K., Elbarkouky R., Kennedy J.: **Construction site layout optimization model considering cost and safety in a dynamic environment**. *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 297–312, Feb. 2021, doi: 10.1007/s42107-020-00314-3.
- [42] Lam K.-C., Ning X., Lam C.-K.: **Conjoining MMAS to GA to Solve Construction Site Layout Planning Problem**. *J Constr Eng Manag*, vol. 135,

- no. 10, pp. 1049–1057, 2009, doi: 10.1061/ASCE0733-93642009135:101049.
- [43] RazaviAlavi S., AbouRizk S.: **Genetic Algorithm–Simulation Framework for Decision Making in Construction Site Layout Planning.** *J Constr Eng Manag*, vol. 143, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001213.
- [44] Alanjari P., Razavialavi S., Abourizk S., Asce M.: **Hybrid Genetic Algorithm-Simulation Optimization Method for Proactively Planning Layout of Material Yard Laydown.** *J Constr Eng Manag*, vol. 141, no. 10, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CO.
- [45] Pham D.T., Onder, H.: **A knowledge-based system for optimizing workplace layouts using a genetic algorithm.** *Ergonomics*, vol. 35, no. 12, pp. 1479–1487, 1992, doi: 10.1080/00140139208967417.
- [46] Singh Kochhar J., Foster B. T., Heragu S.S.: **HOPE: A Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem.** *Comput Oper Res*, vol. 25, no. 7/8, pp. 583–594, 1998.
- [47] Wong C.K., Fung I. W. H., Tam C.M.: **Comparison of Using Mixed-Integer Programming and Genetic Algorithms for Construction Site Facility Layout Planning.** *J Constr Eng Manag*, vol. 136, no. 10, pp. 1116–1128, 2010, doi: 10.1061/ASCECO.1943-7862.0000214.
- [48] Farmakis P.M., Chassiakos A.P.: **Genetic algorithm optimization for dynamic construction site layout planning.** *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 1655–1664, Feb. 2018, doi: 10.1515/otmcj-2016-0026.
- [49] Zavari M., Shahhosseini V., Ardeshir A., Sebt M.H.: **Multi-objective optimization of dynamic construction site layout using BIM and GIS.** *Journal of Building Engineering*, vol. 52, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104518.