

UNIVERZITET „UNION – NIKOLA TESLA“ U BEOGRADU

FAKULTET ZA GRADITELJSKI MENADŽMENT

Dušan Barović

**OBLIKOVANJE I POZICIONIRANJE OBJEKTA
PRIMENOM NUMERIČKE OPTIMIZACIJE U CILJU
POBOLJŠANJA NJEGOVIH PERFORMANSI U
KONTEKSTU ENERGETSKE EFIKASNOSTI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr Aleksandar Gračanac

Beograd, 2018.

UNIVERSITY „UNION – NIKOLA TESLA“ OF BELGRADE
FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT

Dušan Barović

**BUILDING SHAPING AND POSITIONING USING
NUMERICAL OPTIMISATION FOR IMPROVING
ITS PERFORMANCE CONSIDERING ENERGY
EFFICIENCY**

DOCTORAL DISSERTATION

Mentor: prof. dr Aleksandar Gračanac

Belgrade, 2018.

Oblikovanje i pozicioniranje objekta primenom numeričke optimizacije u cilju poboljšanja njegovih performansi u kontekstu energetske efikasnosti

APSTRAKT

Zbog svog značajnog uticaja na energetske performanse i cenu gradnje, oblik i položaj objekta predstavljaju važne faktore u projektovanju zelenih zgrada. Međutim, zbog velikog broja promenljivih i složenosti funkcija cilja optimalno projektovanje energetski efikasnih zgrada spada u teške kombinatorne probleme višekriterijumske optimizacije. Stoga je neophodno opisati konstrukciju i njen položaj u okruženju što je moguće preciznije sa što manje promenljivih. Prikazano istraživanje bilo je usmereno ka iznalaženju podesne metodologije za definisanje geometrije i orientacije date zgrade, kao i njenih elemenata koji su od značaja za analizu energetske efikasnosti. Kako se osnova zgrade predstavlja zatvorenim poligonom, razmatrani su i ocenjivani različiti vidovi opisivanja geometrije poligona u cilju utvrđivanja mogućih problema kao što su epistaza, do koje dolazi kad jedno rešenje „maskira“ druga, i kodni izomorfizam, što je pojava da se isto rešenje pojavljuje više puta opisano na različite načine. Stoga su upoređena dva vida opisivanja geometrije kako bi se utvrdio njihov uticaj na efikasnost i efektivnost pretrage oblasti definisanosti. U optimizacijski model su pored promenljivih vezanih za geometriju uključene i još neke karakteristike fasadnih zidova, kao što su veličina i tip prozora i nadstrešnice. Matematička formulacija problema zasnovana je na dve funkcije cilja, a to su uticaj na okolinu i ukupni troškovi tokom čitavog životnog ciklusa objekta. Mетодологија је тестирана на студији случаја, односно на примеру tipskog sprata poslovne zgrade petougaone osnove применом višekriterijumskog genetskog algoritma.

KLJUČNE REČI: dimenzionisanje; optimizacija; energetska efikasnost; ; energy efficient building; životni vek objekta; genetski algoritmi; opisivanje oblika.

Building shaping and positioning using numerical optimisation for improving its performance considering energy efficiency

ABSTRACT

Due to its significant impact on energy performance and construction costs, shape and spatial orientation are important factors in green building design. However, due to the number of variables and the complexity of objective functions, optimal design of an energy-efficient building is hard combinatorial problem of multi-objective optimisation. Therefore, it is necessary to describe structure and its position in surroundings precisely but by as few variables as possible. Presented research was oriented towards finding adequate methodology for defining geometry and orientation of a given building, as well as its elements of importance for energy-efficiency analysis. The building footprint is represented by a multi-sided polygon. Different geometrical representations for a polygon are considered and evaluated in terms of their potential problems such as epistasis, which occurs when one gene pair masks or modifies the expression of other gene pairs, and encoding isomorphism, which occurs when chromosomes with different binary strings map to the same solution in the design space. Two alternative representations are compared in terms of their impact on computational effectiveness and efficiency. An optimization model is established considering the shape-related variables and several other envelope related design variables such as window ratios and overhangs. Life-cycle cost and life-cycle environmental impact are the two objective functions used to evaluate the performance of a green building design. A case study is presented where the shape of a typical floor of an office building defined by a pentagon is optimized with a multiobjective genetic algorithm.

KEYWORDS: structural design; optimization; energy efficient building; life cycle analysis; genetic algorithms; shape representation.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
1.1 Predmet istraživanja	1
1.2 Obrazloženje o potrebama istraživanja.....	4
1.3 Cilj istraživanja	5
1.4 Primjenjena metodologija	6
1.5 Rezultati istraživanja i njihova primenljivost	7
1.6 Kratak sadržaj.....	8
2. Optimalno projektovanje objekata	9
2.1 Uvodna razmatranja	9
2.2 Istoriski pregled.....	11
2.3 Klasifikacija problema	13
2.4 Formiranje matematičkog modela.....	15
2.5 Višekriterijumska optimizacija	18
2.6 Genetski algoritmi	24
2.6.1 Funkcija prilagođenosti i kaznene funkcije	27
2.6.2 Formiranje početne populacije	29
2.6.3 Kodiranje	30
2.6.4 Operatori selekcije.....	31
2.6.5 Operatori ukrštanja.....	32
2.6.6 Operatori mutacije	33
2.6.7 Politika zamene generacija	34
2.6.8 Kriterijum završetka pretrage	35
2.6.9 Prednosti i nedostaci genetskih algoritama	36
3. Energetski efikasni objekti	40
3.1 Standardizacija zelenih zgrada	47
3.1.1 BREEAM standard	47
3.1.2 LEED standard.....	54
3.1.3 HQE šema sertifikacije	59
3.1.4 DGNB standard	62

3.2 Upravljanje kvalitetom.....	68
3.3 Projektovanje zelenih zgrada.....	71
3.4 Prioriteti u projektovanju zelenih zgrada	72
3.4.1 Ispitivanje pretpostavki	72
3.4.2 Korišćenje integrisanog procesa projektovanja	72
3.4.3 Prelaženje granice zadatog	72
3.4.4 Uključivanje strategije zelene gradnje u svakodnevnu praksu	73
3.5.5 Težnja za zelenim sertifikatima za svoju zgradu	73
3.4.6 Primena kvalitetnih i sertifikovanih proizvoda	73
3.4.7 Smanjenje potrebe za grejanjem i hlađenjem	73
3.4.8 Smanjenje potrebe za transportom	74
3.4.9 Smanjenje potrošnje vode	74
3.4.10 Obezbeđenje zdravog ambijenta.....	75
3.4.11 Optimizacija upotrebe materijala	75
3.4.12 Zaštita i obnova okoline gradilišta	75
3.5 Optimizacija u funkciji održivog razvoja	77
4. Matematička formulacija problema	82
4.1 Definisanje geometrije i položaja objekta.....	82
4.1.1 Prikaz dužina-ugao.....	82
4.1.2 Prikaz dužina-nagib.....	86
4.1.3 Dekartove i polarne koordinate	89
4.1.4 Usvojeni pristup.....	90
4.2 Promenljive	93
4.3 Funkcije cilja	94
4.4 Uslovi ograničenja	96
4.5 Višekriterijumski genetski algoritam	97
4.6 Evaluacija metode optimizacije.....	103
5. Studija slučaja	105
5.1 Postavka eksperimenta.....	105
5.2 Rezultati i diskusija	108
5.2.1 Analiza efektivnosti.....	109
5.2.2 Analiza efikasnosti.....	111

5.2.3 Kvalitativna analiza rezultata	116
5.3 Zaključna razmatranja.....	123
6. Zaključak	125
6.1 Zadaci i ostvareni rezultati	125
6.2 Naučni i stručni doprinos disertacije.....	126
6.3 Pravci i smernice za dalja istraživanja	127
7. Literatura	128
Prilog: Problemi iz paketa <i>G-Suite</i>	157

1. Uvod

1.1 Predmet istraživanja

Iako se, nažalost, u praksi o energetskim i ekološkim performansama objekta obično razmišlja na kraju procesa projektovanja, tek po usvajanju geometrije, konstruktivnog sistema i materijala, mnogo bolji rezultati na tom polju postižu se blagovremenim razmišljanjem o mogućim rešenjima, već u fazi izrade idejnog projekta, tako što se razmatraju različite alternative i u opštim crtama se procenjuju njihove energetske performanse kako bi se izbor suzio na nekoliko potencijalno odgovarajućih rešenja [Men 01, Mil 01]. Podesnim oblikovanjem i pozicioniranjem objekta, potrošnja energije može se umanjiti i do 40 % [Bak 00, Cof 99].

Oblikovanje i pozicioniranje osnove objekta predstavlja jedan od ključnih koraka u fazi izrade idejnog projekta. Kako se na ovaj način definiše položaj zgrade u prostoru i izloženost fasade spoljašnjim uticajima, time se direktno ili indirektno utiče i na ekološke, ekonomski i estetske aspekte budućeg objekta. U praksi se, međutim, odluka o obliku osnove najčešće donosi samo na osnovu estetskih kriterijuma, čime se mogu bitno ograničiti ostale performanse. To se može prevazići primenom adekvatno odabrane metode optimizacije pri utvrđivanju geometrije kako bi se već u fazi izrade idejnog projekta istražile i ispitale različite alternative, ne samo u estetskom smislu, nego i u pogledu ekoloških i ekonomskih performansi.

Optimizacija oblika i dimenzija građevinskih objekata nije nova tema. Rosenman i Gero [Ros 99] su inkorporirali projektantski pristup u genetski algoritam u cilju rešavanja ravanskog problema utvrđivanja podesnog oblika osnove pojedinačne etaže, pri čemu se projekat čitavog objekta razvija sekvencijalnom primenom na konstruktivne celine kao što su prostorne jedinice

i njihove veze. Caldas [Cal 00] je predložio metodologiju za generisanje i optimizaciju trodimenzionalnih arhitektonskih formi u cilju zadovoljena dva kriterijuma u pogledu performansi, a to su maksimalno iskorišćenje dnevne svetlosti uz minimalnu cenu utrošene energije. Na taj način se formiraju različite arhitektonske forme menjanjem dimenzija prostornih elemenata objekta u okviru unapred definisane konfiguracije. Chouchoulas [Cho 03] je razvio prototip u kome se koristi projektantski pristup generisanju trodimenzionalnog modela, gde se modularne stambene jedinice i zajedničke prostorije kombinuju kao osnovne gradivne jedinice, a konačna struktura zgrade i elementi konstrukcije optimizuju se putem genetskog algoritma.

Sva tri pomenuta istraživanja zasnivaju se na pristupu „od dela ka celini“, gde se oblik zgrade formira preraspoređivanjem njenih unutrašnjih elemenata. Takvim pristupom se može doći do širokog dijapazona oblika, od kojih neki mogu predstavljati inovativna rešenja s projektantske i estetske tačke gledišta. Međutim, kao što je Caldas naglasio u [Cal 00], programi za simulaciju zahtevaju detaljne podatke o geometriji osnove i spoljašnjim zidovima zgrade, a uglavnom se generisanjem kontura zgrade kombinovanjem modularnih unutrašnjih elemenata dobijaju relativno složeni poligoni, što bitno otežava proračun.

Za razliku od prethodnog pristupa, u metodi „od celine ka delovima“ polazi se od unapred zadatih spoljašnjih kontura osnove objekta, na osnovu kojih se implicitno razvija unutrašnja organizacija prostora [Mit 77]. Važno preim秉stvo ovakvog pristupa ogleda se u tome što se njime polazi od relativno jednostavnih osnova pravilnog oblika, čime se definiše geometrija zgrade za potrebe programa za energetsku simulaciju, što je i pokazano u nekoliko studija na temu optimizacije energetskih performansi objekta. Prva istraživanja na tu temu bavila su se jednostavnijim problemima, u kojima se unapred prepostavlja pravougaoni oblik osnove, a zatim se za zadatu površinu nalazi optimalan odnos stranica [Bou 00, Pei 99]. Jedrzejuk and Marks [Jer 00] optimizovali su zgradu simetrične osmougaone osnove zarubljuvanjem pravougaonika, dok je Wang [Wan 05a] u optimizaciji zelenih zgrada pored pravougaonih osnova

razmatrao i osnove L oblika. Međutim, zbog velikog broja promenljivih, sve pomente metode ograničene su na jednostavne oblike osnova i stoga su mahom neprimenljive za razvoj složenijih i potencijalno pogodnijih kontura u kontekstu energetske efikasnosti i ekonomskih efekata.

Predmet istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji bilo je utvrđivanje podesne metodologije za optimalno oblikovanje i pozicioniranje objekata u okviru zadatih ulaznih parametara, ne samo sa stanovišta cene materijala i gradnje, nego i u kontekstu energetske efikasnosti tokom čitavog životnog veka građevine.

Ostvareni rezultati pokazuju da se prikazana metodologija može uspešno implementirati u praksi budući da se donosiocu odluke ne nudi samo jedno, teorijski optimalno rešenje, nego čitav niz alternativa rangiranih u odnosu na cenu i energetsku efikasnost razmatranog objekta, tako da može odabratи ono rešenje koje će u datim okolnostima i ograničenjima (budžet, ekološki zahtevi, namena i funkcionalnost objekta) predstavljati kompromis između cene i performansi objekta.

1.2 Obrazloženje o potrebama istraživanja

U Evropi potrošnja energije u stambenim i poslovnim zgradama čini 40 % ukupnog utroška energije [EU 10]. Stoga je jedan od ciljeva koje je postavila Evropska unija da se poboljšaju energetske performanse postojećih zgrada, a da projektovanje energetski efikasnih zgrada postane obavezno u javnom sektoru do 2018. a do 2020. i za sve nove građevine [EU 04, EU 10]. Pored toga, kao što je definisano u Kjoto protokolu Ujedinjenih nacija [UN 98], teži se i smanjenju emisije gasova koji dovode do efekta staklene bašte. Stoga nije iznenadujuće što se u naučnoj i stručnoj literaturi pojavio veliki broj radova o istraživanjima na temu novih tehnoloških rešenja za pojedinačne objekte [Bur 11, Can 15, Gug 07,] i čitava naselja [Pus 14, Sal 15], kao i za poboljšanje energetskih performansi postojećih zgrada i istorijskih objekata [Aro 15, Asd 13, DeL 15, Eva 14, Mur 13, Mur 15, Pag 15, Ram 10]. S gledišta održivog razvoja, optimizacija oblika i pozicije objekta ima za cilj smanjenje utroška energije i uticaja na okolinu po prihvatljivim troškovima gradnje i eksploatacije objekta kao i što je moguće manjim uticajima na životnu sredinu tokom gradnje i trajanja životnog veka objekta sve do njegovog rušenja. Kako se poboljšanje energetske efikasnosti postiže relativno skupim materijalima i tehničkom opremom, jasno je da su navedeni ciljevi u koliziji te se stoga nameće zaključak da ne postoji jedinstveno rešenje problema koje bi dalo najbolji rezultat po svim navedenim kriterijumima, nego čitav dijapazon različitih rešenja između kojih donosilac odluke (projektant, investitor ili naručilac) može da odabere ono koje mu je u datim okolnostima najprihvatljivije.

Iz napred navedenog, vidi se da je neophodno pronaći matematički aparat koji bi mogao da uzme u obzir sve promenljive i da u skladu sa suprotstavljenim kriterijumima i funkcijama cilja primenom višekriterijumske optimizacije iznađe dovoljan broj potencijalno zadovoljavajućih rešenja na osnovu kojih će donosilac odluke dobiti jasan uvid u alternative koje ima na raspolaganju, kao i informacije o uticaju izmena pojedinih parametara objekta na ekonomske i ekološke aspekte objekta.

1.3 Cilj istraživanja

Kao što je ranije rečeno, u optimizaciji kombinacija karakteristika i elemenata energetski efikasnih zgrada ne postoji jedinstveno rešenje problema, nego čitav niz potencijalno prihvatljivih alternativa između kojih donosilac konačne odluke može odabrati onu koja će u datim okolnostima predstavljati prihvatljiv kompromis između ekološkog i ekonomskog aspekta problema. Da bi se to omogućilo, u fazi izrade idejnog rešenja kreiraju se i razmatraju različite mogućnosti i kombinacije elemenata kako bi se došlo do nekoliko prihvatljivih potencijalnih rešenja, što se postiže kombinovanjem različitih konstruktivnih i tehnoloških elemenata i parametara, kao što su geometrija i orijentacija zgrade, izbor materijala i tipa konstrukcije i sl.

Cilj istraživanja pri izradi ove disertacije bio je razvoj metodologije za optimizaciju zgrade s osnovom oblika proizvoljnog poligona u cilju iznalaženja kompromisa između dva suprotstavljenih cilja, a to su postizanje minimalne cene koštanja životnog ciklusa zgrade uz minimalne uticaje na okolinu. Osnovni cilj bio je da se utvrdi najpodesniji način opisivanja geometrije objekta, tako da oblik osnove više ne predstavlja ograničenje ni u pogledu arhitektonskih zahteva, niti što se tiče programa za simulaciju eneregetskih performansi.

1.4 Primjenjena metodologija

Istraživanje je u metodološkom smislu bilo zasnovano na adekvatno odabranim savremenim naučnim metodama. Analizom dostupne naučne i stručne literature dobio se jasan uvid u nova dostignuća na polju optimalnog projektovanja objekata s posebnim osvrtom na njihove ekološke i energetske performanse, kao i na metode numeričke višekriterijumske optimizacije koje se primenjuju u građevinarstvu.

Primenom indukcije i dedukcije uspostavljeni su kriterijumi koje treba da zadovolji adekvatna metodologija dobijanja kvalitetog Pareto fronta primenom višekriterijumske optimizacije. Formulisani su merodavni kriterijumi za poređenje efikasnosti i efektivnosti višekriterijumskih heuristika kako bi se razvila metodologija izbora najpodesnije metode proračuna za dati problem.

Primenom matematičke logike formulisana su dva metoda za opisivanje geometrije i položaja objekta zadate površine, a zatim su razmatrani pristupi testirani primenom na studiju slučaja s ciljem da se pored optimalnog oblika i položaja objekta utvrdi i niz drugih parametara konstrukcije s aspekta njene cene i uticaja na okolinu. Na istom primeru prikazana je i analiza dobijenih rezultata sa tehnno-ekonomski tačke gledišta, odnosno na način na koji se to obavlja u realnim uslovima, tj. u praksi.

1.5 Rezultati istraživanja i njihova primenljivost

Rezultati analize prikazane u disertaciji mogu se uspešno primeniti za rešavanje praktičnih problema višekriterijumske optimizacije objekata s naglaskom na razmatranje i analiziranje objekata složenih oblika osnove.

U naučnom smislu, pokazano je da opisivanje geometrije osnove objekta putem pristupa dužina-nagib daje bolje rezultate od pristupa dužina-ugao u pogledu najbitnijih performansi višekriterijumskog genetskog algoritma, a to su brzina konvergencije i ravnomernost dobijenog Pareto fronta i da visok nivo epistaze ima izrazito negativan uticaj na konvergenciju algoritma i zato treba izbegavati takve metode opisivanja geometrije objekta, dok kodni izomorfizam ne predstavlja značajan problem u razmatranoj metodi optimizacije, budući da remapiranje stranica poligona nije pokazalo bitan uticaj na konvergenciju genetskog algoritma.

Što se tiče doprinosa struci, dokazana je postojanje dva jasno uočljiva trenda u vezi između oblika objekta i njegovih ekoloških i ekonomskih performansi. Rešenja sa nižim troškovima izgradnje i eksploatacije objekta teže obliku kompaktnog, pravilnog mnogougla, dok su rešenja sa nižim uticajem na okolinu izrazito izrazito izdužena u pravcu istok-zapad kako bi se obezbedila maksimalna dužina i izloženost južne fasade.

Prikazana metodologija može se uspešno implementirati za realne probleme optimalnog projektovanja energetski efikasnih objekata zato što donosilac odluke može na osnovu dobijenog Paretofronta usvojiti rešenje koje mu najviše odgovara u datim uslovima.

1.6 Kratak sadržaj

Disertacija se sastoji od sedam poglavlja. U prvom su objašnjeni i obrazloženi predmet i cilj istraživanja, kao i obrazloženje o potrebama istraživanja. Navedena je metodologija naučno-istraživačkog rada i ukratko su dati naučni i stručni aspekti ostvarenih rezultata, kao i kratak sadržaj disertacije.

U drugom poglavlju objašnjeni su osnovni pojmovi optimalnog projektovanja objekata i optimizacije u građevinarstvu. Dat je kratak pregled istorijskog razvoja metoda optimizacije, kao i klasifikacija problema optimizacije u građevinarstvu s posebnim osvrtom na matematičke modele i višekriterijumsku optimizaciju. Zatim su opisana i objašnjena osnovna svojstva i parametri genetskih algoritama i dat je kratak osvr na optimizaciju s tačke gledišta održive gradnje.

Treće poglavlje daje osnovne informacije o načelima, projektovanju, gradnji i sertifikaciji energetski efikasnih objekata s posebnim osvrtom na ekološke aspekte optimizacije.

U četvrtom poglavlju data je matematička formulacija razmatranih metoda opisivanja geometrije i položaja poligonalnog objekta u prostoru. Detaljno su objašnjene i poisane razmatrane promenljive, funkcije cilja, uslovi ograničenja i metodologija evaluacije efikasnosti i efektivnosti višekriterijumskog genetskog algoritma.

U petom poglavlju je razmatrana metodologija testirana primenom studije slučaja, uz detaljnu analizu performansi algoritma pretrage i kvaliteta dobijenih rešenja, a data je i analiza uticaja promene parametara konstrukcije na njene ekonomske i ekološke performanse.

U šestom poglavlju data su zaključna razmatranja, nakon čega sledi spisak korišćene literature i prilog u kome su izloženi zadaci za testiranje metoda optimizacije.

2. Optimalno projektovanje objekata

2.1 Uvodna razmatranja

Tokom svih faza procesa projektovanja građevinskog objekta, projektant neprestano mora da donosi odluke o odgovarajućem ili najboljem izboru različitih svojstava konstrukcije, kao što su nosivost, krutost, upotrebljivost, izvodljivost i estetski aspekti, što znači da se čitav proces projektovanja može donekle posmatrati kao optimizacija konstrukcije, čak i kad se optimalnost ne razmatra eksplisitno.

Pod optimalnim projektovanjem konstrukcija obično se podrazumeva primena odgovarajućih metoda optimizacije u cilju određivanja statičkog sistema, oblika i dimenzija poprečnog preseka, kao i izbor vrste i kvaliteta materijala, kako bi konstrukcija zadovoljavala sve tehničke zahteve po pitanju mehaničkih svojstava, nosivosti i upotrebljivosti, a da pri tom njena konačna cena, uključujući i cenu izrade, bude što je moguće niža. Vrlo često se umesto cene kao kriterijum optimalnosti usvaja težina konstrukcije, budući da su te dve veličine obično usko povezane.

Međutim, u građevinarstvu se optimizacija ne može posmatrati isključivo kao matematički problem, bez razmatranja izvodljivosti rešenja. U literaturi se mogu naći mnoga rešenja koja su matematički potpuno ispravna, ali su takoreći neprihvatljiva ili teško primenljiva u realnim uslovima. Stoga zadatak optimizacije treba posmatrati u širem kontekstu od teorijskog i pristupiti njegovom rešavanju na način na koji to rade projektanti, tj. imajući u vidu i tehnologiju izvođenja konstrukcije, a neretko i njena estetska svojstva i svrshishodnost.

Kako na svojstva i cenu konstrukcije utiču brojni parametri, praktično je nemoguće, ili bar neisplativo, sprovesti čitav proračun za sve njihove kombinacije da bi se odredilo koja je najpovoljnija. U praksi je, nažalost, uobičajen pristup da se razmatra samo nekoliko konceptualno prihvatljivih idejnih rešenja razvijenih na osnovu intuicije i iskustva, pa da se kao konačno usvoji ono koje će dati najnižu cenu, pri čemu ne postoji garancija da je ono zaista optimalno i da ne postoji neko bolje.

2.2 Istoriski pregled

Počeci optimalnog oblikovanja konstrukcija obično se pripisuju Galileju [Gal38]. Međutim, njegovo razmatranje optimalnog oblika grede opterećene statičkim opterećenjem uglavnom je na intuitivnom nivou, tako da se ne može smatrati teorijskom osnovom optimizacije u projektovanju. Prve radove iz ove oblasti zasnovane na naučnim principima dali su krajem 19. i početkom 20. veka Kulman [Cul 75], Maksvel [Max 90], Sili [Cil 00] i Mičel [Mic 04]. Potom nastupa zatišje tokom koga se ovom temom bavilo vrlo malo naučnika, među kojima je bio i Đorđe Lazarević [Laz 38]. Razvoj optimizacije kao naučne discipline nastavio se tek sredinom 20. veka, pojavom operacionih istraživanja. Nakon Kantorovičevih radova kao osnove linearнog programiranja [Kan 39], Dancigove formulacije simpleks metode 1947 [Dan 63], kao i Karuš-Kun-Takerovih uslova za rešenja problema nelinearnog programiranja [Kar 39, Kuh 51], stekli su se uslovi za razvoj optimizacionih metoda u svim poljima nauke i tehnike, a do prave ekspanzije na ovom polju dolazi pedesetih i šezdesetih godina, pojавom računara.

Prva rešenja praktičnih problema iz oblasti optimalnog projektovanja dali su Šenli [Sha 52], Džerard [Ger 56], Livzli [Liv 56] i Šmit [Sch 60].

Kako računarska tehnologija još nije bila dovoljno razvijena da bi se mogla primeniti na rešavanje složenijih realnih problema u projektovanju, metode optimizacije su se tokom sedamdesetih razvijale za relativno male konstrukcije ograničenih dimenzija. U ovom periodu, naročito značajan doprinos na polju optimizacije konstrukcija dao je Prager svojim radovima na temu ograničenja i graničnih uslova pri formiraju proračunskih modela [Pra 68, Pra 71, Pra 72, Pra 74a, Pra 74b], kao i analizom ramovskih nosača pod promenljivim opterećenjem [Pra 67] i optimalnim oblikovanjem rešetkastih nosača [Pra 76], dok se počeci savremenog pristupa optimizaciji u dimenzionisanju rešetkastih i ramovskih nosača pripisuju se Venkaji [Ven 73] i

Dobsu [Dob 69, Dob 75]. Detaljniji pregled radova iz ovog perioda može se naći u [Ven 78, Ven 83].

Razvoj novih metoda i pristupa na polju operacionih istraživanja, a samim tim i optimalnog projektovanja konstrukcija, nadalje je tekao uporedo s razvojem računarske tehnologije. U matematičkom smislu, najznačajnije pomake napred predstavljale su pojava heurističkih metoda pedesetih i šezdesetih godina 20. veka i pojava metaheuristika osamdesetih. Devedesetih godina je metaheuristički pristup prevladao je nad klasičnim, tako da se od tada, kada su istraživanja u pitanju, porede različite metaheuristike ili različita metodološka načela u okviru iste metaheuristike.

Primena metaheuristika je omogućila prevazilaženje problema matematičke formulacije proračunskog modela primenom glatkih, diferencijabilnih i integrabilnih funkcija, tako da je stvoren teren za uvođenje višekriterijumske optimizacije i rešavanja sve složenijih zadataka iz domena operacionih istraživanja. Iako se tokom poslednjih petnaest godina pojavio veliki broj radova u kojima se kombinuju (hibridizuju) različite metode optimizacije i popravlja njihova efikasnost primenom novih operatora za pretraživanje, dalji napredak na polju optimalnog projektovanja uglavnom se ogleda u matematičkom tretiranju problema, ali relativno malo autora bavilo se novim metodološkim pristupima s projektantske tačke gledišta.

Više podataka o razvoju savremenih metoda optimizacije u projektovanju može se pronaći u [Ohs 11, Haf 90, Ade 94, Bur 02, Aro 02, Aro 04, Aro 07].

2.3 Klasifikacija problema

Budući da su se tehnike optimalnog projektovanja konstrukcija razvijale uporedno u celom svetu, u literaturi postoji više različitih terminologija i klasifikacija ovog problema ali u načelu se sve svode na podelu koju je 2003. godine dao Stiven [Ste 03], a koja obuhvata sledeće kategorije:

- optimizacija topologije;
- optimizacija oblika;
- optimizacija dimenzija;
- topografska optimizacija.

Optimizacija topologije (ili statička optimizacija) predstavlja najopštiji tip problema, pošto su kao polazni podaci poznati jedino uslovi koje nameće okruženje (npr. raspon i opterećenja), kriterijum optimalnosti (npr. najniža cena) i opšti uslovi ograničenja (npr. dopušteni naponi i ugibi) [Ben 03]. U građevinarstvu se ovaj tip optimizacije najčešće koristi za izbor optimalnog statičkog sistema mostovskih i krovnih konstrukcija, pogotovo kod rešetkastih nosača u slučajevima kad raspored i položaj čvorova nije unapred definisan [Olh 80, Ima 82, Twu 92, Dem 95, Boj 98a, Boj 98b, Boj 99, Ach 99a, Ach 99b, Lia 99, Ohs 99a, Ohs 99b, Gil 01, Kim 02, Ben 03, Ohs 05, Ohs 07a].

Optimizacija oblika obuhvata probleme kod kojih je topologija nosača unapred poznata, ali je neophodno utvrditi optimalnu geometriju nosača ili poprečnog preseka na određenim segmentima kako bi se rešio problem prevelikih napona, izvijanja, izbočavanja i sl. Najviše radova na oву temu bavi se optimalnim oblikom metalnih rešetkastih nosača [Dob 69, Sva 69, Ben 89, Ohs 09], dok su u domenu armiranobetonskih konstrukcija primeri za ovu klasu problema određivanje optimalnog oblika otvora u pločama [Ped 00] i gredama [Yos 02], optimalnog oblika prefabrikovanog potpornog zida [Cer 01] i stubova [Yos 95].

Optimizacija dimenzija (optimalno dimenzionisanje) predstavlja najčešći tip problema, budući da se topologija i oblik nosača obično usvajaju unapred na osnovu arhitektonskih i tehničkih zahteva koje konstrukcija mora da ispunи [Lin 82, Gri 93, Kir 95, Sch 03, Zou 05]. U zavisnosti od toga da li se dimenzije poprečnih preseka razmatraju kao diskretne ili kontinualne promenljive, problemi iz ove kategorije mogu su podeliti u dve grupe, a to su diskretizovani i kontinualni problemi.

U okviru diskretizovanih problema razmatraju se nosači kod kojih su svojstva poprečnog preseka različitih štapova međusobno nezavisna, tako da se svaki razmatra (dimenzišće) zasebno, dok se konstrukcija kao celina sagledava jedino u kontekstu statičkog sistema [Kam 01, Ron 01, Gre 01, Gre 03]. Tipičan primer za ovu grupu problema predstavlja dimenzionisanje metalnih rešetkastih nosača, kod kojih se poprečni preseci štapova usvajaju iz kataloga raspoloživih profila.

U kontinualnim problemima objekat se mora razmatrati u celini, kao jedinstven sistem, pošto određen broj nepoznatih ima kontinualan karakter, tj. ponavlja se u celoj konstrukciji ili bar u jednom njenom delu (npr. širina ili visina poprečnog preseka, ili moment inercije). Tipičan primer za ovakve probleme su armiranobetonske kontinualne grede i višebrodni ramovski nosači [Moh 93, Ada 94, Zie 95, Fad 96, Bal 97].

Topografska optimizacija se odnosi na nalaženje najpovoljnijeg oblika ljudski, membrana i šatorastih konstrukcija. U literaturi ima veoma malo radova iz ove oblasti, pogotovo kad je reč o armiranobetonskim konstrukcijama [Gos 96, Sch 01], dok kod optimalnog oblikovanja dimenzionisanja rešetkastih kupola naglasak uglavnom nije na obliku kupole, nego samo na koordinatama čvorova i izboru poprečnih preseka štapova za unapred zadatu geometriju [Gos 96, Ohs 97, Ohs 00, Sch 01, Ohs 03, Ohs 08].

Naravno, većina realnih problema ne može se svrstati u samo jednu od ovih kategorija zato što predstavlja njihovu kombinaciju [Lin 82, Zho 91, Ben 94, Ohs 98, Ach 07, Ohs 07a].

2.4 Formiranje matematičkog modela

Optimizacija predstavlja određivanje vrednosti niza parametara tako da dati problem dobije optimalno rešenje, koje se najčešće ogleda u minimalnoj ili maksimalnoj konačnoj vrednosti funkcije cilja. Pri tom se može zahtevati da ti parametri zadovoljavaju određene uslove ograničenja. Primera radi, za određeni proizvodni proces može se tražiti maksimalan učinak, maksimalna dobit ili minimalni troškovi proizvodnje uz ograničenje po pitanju broja angažovanih mašina ili radnika. Pored toga, može se zahtevati da optimalno rešenje zadovoljava dve ili više funkcija cilja i tada je reč o višekriterijumskoj optimizaciji.

Izrada odgovarajućeg matematičkog modela predstavlja osnovni preduslov za efikasno rešavanje problema, pošto svi uslovi i zahtevi moraju da se formulišu precizno i u skladu sa odgovarajućim metodom traženja rešenja.

Problem optimizacije načelno se može formulisati na sledeći način:

Odrediti optimalnu (minimalnu ili maksimalnu) vrednost funkcije cilja:

$$y = f_{(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (2.1)$$

tako da budu ispunjeni uslovi ograničenja:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = 1, \dots, p \quad (2.2)$$

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, \dots, q \quad (2.3)$$

$$x_i^d \leq x_i \leq x_i^u, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

Veličine x_i su promenljive čije vrednosti treba utvrditi ili odabratи tako da funkcija cilja ima optimalnu vrednost, a rešenje problema opisuje se vektorom X , koji ima oblik uređene n -torke:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2.5)$$

Pri tom, promenljive x_i moraju da ispunе određene uslove ograničenja, koji se mogu odnositi na opseg u kom se kreću njihove vrednosti (2.4) ili na njihove međusobne veze opisane matematičkim relacijama u vidu nejednačina (2.2) ili jednačina (2.3). U određenim slučajevima matematički model može da sadrži više od jedne funkcije cilja i tada je reč o višekriterijumskoj optimizaciji, pošto treba pronaći rešenje koje predstavlja kompromis m različitih kriterijuma:

$$y = (f_{1(x)}, \dots, f_{m(x)}) \quad (2.6)$$

Kao što je već rečeno, u optimalnom projektovanju se kao osnovno merilo optimalnosti najčešće usvaja ukupna cena konstrukcije. Kod armiranobetonskih nosača, u obzir treba uzeti količine betona, armature i oplate (uključujući i cenu rada), dok se kod metalnih konstrukcija traži minimalna težina, pošto ona direktno određuje cenu.

Shodno tome, u matematičkoj formulaciji problema za armiranobetonske nosače funkcija cilja (2.1) u opštem slučaju ima sledeći oblik:

$$f_{(x)} = \sum_{i=1}^N (V_i P_b + W_i P_a + A_i P_o) \quad (2.7)$$

gde je N broj različitih elemenata u nosaču, V_i zapremina i -tog elementa, W_i ukupna težina armature, A_i površina oplate, a P_b , P_a i P_o su jedinične cene betona, armature i oplate s uračunatom cenom rada. Nepoznate veličine koje treba odrediti su: dimenzije poprečnog preseka svakog elementa (b_i , d_i), marka betona (ukoliko nije unapred zadata) i potrebna armatura. Pošto se za svaki element konstrukcije armatura određuje zasebno, neophodno je prvo pronaći adekvatno rešenje problema za gredni nosač ($N=1$), pošto iz njega proizilazi rešenje i za složenije nosače (rešetke i ramove).

Za metalnu konstrukciju sačinjenu od N elemenata, funkcija cilja ima oblik:

$$f_{(x)} = W = \sum_{i=1}^N \rho_i l_i A_i \quad (2.8)$$

gde je W ukupna težina konstrukcije, a ρ_i , l_i i A_i su gustina (ili specifična težina) materijala, dužina i površina poprečnog preseka i -tog elementa, respektivno. Nepoznate veličine su površine poprečnih preseka elemenata, koje mogu biti kontinualne (ako se profili usvajaju naknadno) ili diskretne (ako se poprečni preseci usvajaju iz postojećeg kataloga gotovih profila). Budući da je u ovom slučaju optimizacija grednog nosača trivijalan problem, u nastavku teksta razmatraće se isključivo složene konstrukcije, tj. ravanske i prostorne rešetke.

Uslovi ograničenja (2.2–2.4) mogu se definisati arhitektonskim zahtevima (minimalne i maksimalne dopuštene dimenzije poprečnog preseka) ili zahtevima po pitanju nosivosti i upotrebljivosti u skladu s odgovarajućim propisima i standardima, što znači da se unapred propisuju granične vrednosti napona, deformacija i pomeranja.

Kako je sopstvena težina nosača direktno vezana za površinu poprečnog preseka, a njegovo ponašanje pri naprezanju zavisi od geomtrijskih karakteristika, jasno je da svaka varijacija promenljivih dovodi do izmene ulaznih parametara. To znači da utvrđivanje optimalnih dimenzija i oblika poprečnog preseka nosača predstavlja nelinearan kombinatorni problem iz klase tzv. NP-teških problema, to jest problema za koje ne postoje direktni postupci rešavanja ili su, ako postoje, toliko složeni da zahtevaju previše računarskog vremena. Stoga se ovakvi problemi obično ne reševaju determinističkim metodama, nego stohastičkim, zasnovanim na pretraživanju skupa dopustivih rešenja u potrazi za najboljim.

2.5 Višekriterijumska optimizacija

Problemi višekriterijumske optimizacije bitno se razlikuju od jednokriterijumskih problema, pre svega zato što se svi faktori koji utiču na odluku posmatraju kao kriterijumi čije vrednosti treba da budu optimalne, tj. treba naći rešenje koje je najbolje po svim razmatranim kriterijumima istovremeno. Pri tom kriterijumi mogu po svojoj prirodi da budu veoma raznorodni (ekonomski, tehnički, tehnološki, ekološki, itd.) i izraženi različitim merilima, kao što su novčane jedinice, fizičke veličine, verovatnoće ili subjektivne procene u skladu sa skalom prihvatljivosti koja se formira za konkretan problem. Sve ovo ukazuje na zaključak da konačno rešenje ne može da se odredi bez učešća donosioca odluke, kome treba ostaviti slobodu da prihvati, promeni ili odbaci rešenje dobijeno na osnovu matematičkog modela. U zavisnosti od prirode problema, višekriterijumski zadaci mogu se podeliti u tri grupe [Vuj99]:

1. **zadaci višekriterijumske optimizacije**, kojima se rešavaju problemi određivanja podskupa rešenja koja zadovoljavaju određene uslove i/ili izbora jednog rešenja iz tog podskupa;
2. **zadaci višekriterijumskog rangiranja**, kojima se rešavaju problemi određivanja potpunog ili delimičnog redosleda (rang liste), rešenja koja pripadaju konačnom i prebrojivom skupu;
3. **zadaci višekriterijumske selekcije**, kojima se rešavaju problemi izbora određenog broja rešenja koja pripadaju konačnom i prebrojivom skupu.

U praksi se veoma retko dešava da problem višekriterijumskog odlučivanja ima jedinstveno, tzv. *savršeno rešenje*, koje zadovoljava sve zadate kriterijume. Zbog različitosti i raznorodnosti kriterijuma, kao se rezultat dobija više rešenja između kojih donosilac odluke bira jedno i ono se naziva *najbolje* ili *preferirano rešenje*. Budući da nema opravdanja da se ma koje rešenje smatra optimalnim ako ne zadovoljava sve kriterijume, nameće se potreba za

preispitivanjem koncepta optimalnosti, pa se u višekriterijumskoj optimizaciji uvodi drugačiji koncept za procenu prihvatljivosti rešenja, a to je *koncept Pareto optimalnosti* [Par96]. U tom slučaju, rešenje problema naziva se *dominantno rešenje* (nedominirano ili Pareto optimalno rešenje), ako u dopustivom skupu ne postoji nijedno koje bi bilo bolje bar po jednom kriterijumu, a da pri tom nije gore ni po jednom drugom. Drugim rečima, poboljšanje dominantnog rešenja po bar jednom kriterijumu dovelo bi do pogoršanja po nekom drugom. Skup svih Pareto rešenja naziva se *Pareto set*, a njihov grafički prikaz *Pareto front* [Coe 02].

U zavisnosti od toga kako se i kada donosilac odluke uključuje u rešavanje problema, razlikuju se tri grupe metoda rešavanja, a to su apriorni, aposteriorno i interaktivni pristup [Coe 07]. U aposteriornom pristupu, donosilac odluke se uključuje u analizu i rešavanje problema nakon određivanja skupa dominantnih rešenja i prepušta mu se da izabere najbolje od ponuđenih, a zadatak analitičara je da iz dopustivog skupa izdvoji podskup dominantnih rešenja. U apriornom pristupu, donosilac odluke unapred iskazuje svoj odnos prema kriterijumima definisanjem prioriteta ili hijerarhije kriterijuma dodeljivanjem težinskih koeficijenata ili određivanjem relativnih odnosa između kriterijuma. Interaktivni pristup predstavlja kombinaciju prethodna dva, zato što je donosilac odluke neprekidno uključen u proces rešavanja problema. Ovaj pristup se zasniva na parametarskoj analizi i analizi osetljivosti i podrazumeva neprekidno korišćenje računara.

Dobro struktuirani problemi imaju sledeća svojstva: moguće je formulisati jasan matematički model problema; model ima više dopustivih rešenja i sadrži funkcije kriterijuma na osnovu kojih se ona vrednuju; postoji odgovarajuća matematička procedura za dobijanje rešenja, koja se sastoji od prihvatljivog broja operacija ili koraka.

Ukoliko nema navedena svojstva, problem se smatra loše matematički struktuiranim. Između dobro i loše struktuiranih problema ne postoji jasna granica, pošto navedeni uslovi mogu biti delimično ispunjeni, ili je, čak i ako su zadovoljeni svi zahtevi, postupak rešavanja neprihvatljivo složen ili spor. Za

rešavanje dobro strukturiranih problema koriste se matematičke ili egzaktne metode, dok se za slabo strukturirane probleme koriste heurističke ili približne metode.

Pristup traženju rešenja problema direktno zavisi od strukture matematičkog modela, odnosno od prirode promenljivih i funkcija cilja i ograničenja. Shodno tome, metode se generalno mogu podeliti na determinističke i stohastičke [Pra 92].

Determinističke metode se koriste za matematički dobro strukturirane probleme i kod njih se vrednosti svih parametara u matematičkom modelu mogu odrediti s potpunom izvesnošću. Rešavanje problema sprovodi se primenom odgovarajućeg algoritma, tj. niza logičkih i matematičkih operacija koje se izvršavaju po određenom redosledu. Najčešće se koriste iterativni postupci, kod kojih se polazi od pretpostavljenog početnog rešenja problema i od njega se primenom koraka predviđenih algoritmom dobija novo, bolje rešenje. Novodobijeno rešenje se zatim tretira kao polazno i postupak se ponavlja. Proces se nastavlja sve dok se ne ispuni uslov završetka algoritma, a to su najčešće konvergencija (kada više nema značajnog napretka) ili ostvaren unapred zadat broj iteracija.

Budući da se većina zadataka optimizacije rešava primenom računara, složenost problema izražava se računarskim resursima, odnosno procesorskim vremenom i količinom memorijskog prostora koji su potrebni za nalaženje rešenja. Drugim rečima, nije dovoljno da postoji algoritam za rešavanje datog problema, nego i da taj algoritam bude efikasan, odnosno da ne zahteva nerealne računarske resurse ili previše vremena. Zato se u slučaju teških kombinatornih problema sa mnogo promenljivih i/ili složenih uzročnoposledičnih veza između promenljivih i vrednosti funkcije cilja i uslova ograničenja često dešava da egzaktne metode budu neprimenljive čak i kad je problem dobro struktuiran, što je upravo slučaj kod optimalnog dimenzionisanja konstrukcija. Stoga se za rešavanje takvih problema primenjuju približne metode – heuristike i metaheuristike – koje se zasnivaju na pretraživanju prostora dopustivih rešenja. Iako su se pokazale kao veoma delotvorne, heuristike ne pružaju

garanciju da će se uvek doći do najboljeg mogućeg rešenja, nego do najboljeg u konkurenciji dovoljno dobrih u skladu sa zadatim uslovima, pa se zato rešenja dobijena na ovaj način nazivaju suboptimalnima.

Iako su rezultati dobijeni primenom heuristika nepouzdaniji u odnosu na one dobijene egzaktnim metodama, one su univerzalnije pošto u opštem slučaju ne zavise od oblika, definisanosti i neprekidnosti funkcije cilja i uslova ograničenja. Stoga se heurističke metode koriste i kada nije moguće definisati matematički model, tj. za probleme koji nemaju poželjne karakteristike kao što su konveksnost, diferencijabilnost itd. Može se reći da je heuristika tehnika kojom se traži dobro rešenje zadatka za relativno kratko vreme, bez mogućnosti garantovanja njegove dopustivosti i optimalnosti, a često čak ni njegove bliskosti optimalnom rešenju. Za neke heuristike se može pronaći gornja granica relativne greške njenog rešenja u odnosu na optimalno rešenje ili se može eksperimentalnim putem doći do zaključka da je data metoda bolja od drugih. Kod heuristika je poseban akcenat na relativno kratkom vremenu traženja rešenja, budući da je u većini slučajeva kada je obim problema veliki, nemoguće naći egzaktno rešenje u razumnom vremenu.

Klasične heuristike su se razvijale postepeno, prateći razvoj kompjuterske tehnologije, ali je sve vreme njihov osnovni nedostatak bio to što su se formirale u cilju rešavanja pojedinačnih, konkretnih problema, tako da je njihova efikasnost bila direktno vezana za formulaciju zadatka. Poboljšanje karakteristika računara kao i načina čuvanja i struktuiranja podataka, dovelo je do daljeg razvoja heuristika tako da su nastale nove klase, tzv. moderne heuristike ili metaheuristike. Za razliku od klasičnih heuristika, metaheuristike sadrže pravila i načela koja u opštem slučaju ne zavise od prirode problema i zato se mogu primeniti pri rešavanju velikog broja praktičnih zadataka iz različitih oblasti. Devedesetih godina dvadesetog veka metaheuristički pristup prevladao je nad klasičnim, tako da se od tada, kada su istraživanja u pitanju, porede različite metaheuristike ili različita metodološka načela u okviru iste metaheuristike. Zahvaljujući svojim svojstvima, metaheuristike su mnogo opštije

i univerzalnije metode od klasičnih heuristika, te se stoga mogu uspešno primenjivati na širok spektar problema.

Metaheurističke metode pretražuju skup dopustivih mogućnosti u cilju nalaženja što boljeg rešenja, pri čemu su dopušteni čak i naizgled nepovoljni potezi, kao što su kretanje ka lošijem rešenju od trenutnog, proširivanje trenutne oblasti pretrage nedopustivim ili neodgovarajućim elementima, traženje rešenja kombinovanjem postojećih itd. Mnoge metaheuristike inspirisane su spontano konvergirajućim procesima u prirodi i tehnici, tako da u opštem slučaju uopšte ne zavise od kvaliteta matematičke formulacije problema.

U najpoznatije metaheuristike koje su danas u upotrebi spadaju evolucijski algoritmi [Gol 89, Mic 96, Bäc 95, Bäc 96], tabu pretraživanje [Glo 90, Glo 97, Her 97, Mis 05], simulirano kaljenje [Krp 83, Sum 02, Sum 06], Lagranževa relaksacija [Bea 95, Fis04, Bea88, Ong04, Tan06], metoda promenljivih okolina [Han01, Han07, Kov 08] i brojni algoritmi inspirisani prirodom, kao što su mravlji algoritam i simulacija roja pčela [Dor 91, Dor 92, Dor 96, Dor 04, Ken 01]. Pri rešavanju nekog problema dozvoljeno je, a često i neophodno, kombinovanje (hibridizacija) različitih pristupa, tako da se u literaturi mogu naći hibridi takoreći svih metaheuristika, kao i kombinacije metaheuristika i egzaktnih metoda.

Detaljan opis metaheuristika može se naći u [Glo 03, Osm 96a, Osm 96b, Rib 02].

U jednokriterijumskoj optimizaciji, merila za ocenu efikasnosti i poređenje različitih metoda pretraživanja veoma su jednostavna i uglavnom se svode na razmatranje tačnosti, pouzdanosti i brzine. Tačnost je primarni kriterijum, koji pokazuje sa kolikom preciznošću razmatrana metoda može da pronađe zadovoljavajuće rešenje. Da bi se to utvrdilo, koriste se standardne matematičke funkcije za testiranje za koje su poznata tačna rešenja, ili problemi za koje u literaturi postoje rešenja različitih autora. Budući da su metaheuristike uglavnom stohastičke metode, nikada se sa sigurnošću ne može tvrditi da je dobijeno rešenje zaista najbolje. Stoga se pouzdanost proverava tako što se

proračun sprovede više puta kako bi se na osnovu svih dobijenih rezultata videlo koliko je puta pronađeno optimalno rešenje, a koliko se puta pretraga završila u lokalnom ekstremumu umesto u globalnom. Brzina proračuna ocenjuje se ili na osnovu prosečnog vremena rada programa ili na osnovu broja iteracija do nalaženja optimalnog rešenja. Međutim, u višekriterijumskoj optimizaciji najčešće ne postoji jedinstveno, savršeno rešenje problema, nego se dobija čitav niz rešenja koja su najbolja po različitim kriterijumima (Pareto front ili Pareto set), a donosilac odluke bira ono koje smatra najpovoljnijim. Shodno tome, merila koja važe za metode jednokriterijumske optimizacije ovde su samo delimično primenljiva ili potpuno neprimenljiva. U literaturi ima veoma malo radova na temu evaluacije različitih metoda višekriterijumske optimizacije i o tehnikama poređenja različitih Pareto frontova dobijenih za isti problem [Esb 96, Fon 96, Fon 98, Rud 98, Zit 98, Zit 99, Zit 00, Kav 13]. Jedan od podesnih metoda za ocenu kvaliteta rešenja jeste Ciclerov trokriterijumski set za evaluaciju metoda višekriterijumske optimizacije [Zit 00], čija posebna pogodnost leži u činjenici da se može koristiti čak i za probleme u kojima nije poznato tačno rešenje problema.

2.6 Genetski algoritmi

Genetski algoritmi (GA) su zasnovani na Darvinovoj teoriji o postanku vrsta i prirodnoj evoluciji [Dar 59] i Mendelovim zakonima [Bow 89] koji su se pojavili krajem devetnaestog veka, a sâm princip rada zasnovan je na biologiji – tačnije genetici. Sva svojstva jednog živog organizma određena su njegovim genetskim kodom, a zapisana su u hromozomima. Hromozomi su sačinjeni od gena, koji predstavljaju blokove DNK, a svaki gen opisuje neku osobinu organizma. U toku reprodukcije odabrani roditelji rekombinuju (ukrštaju) gene i time se formiraju novi hromozomi – potomci. Dodatne promene genetskog zapisa odigravaju se putem mutacija, odnosno malih nasumičnih izmena u genima. Kvalitet (prilagođenost) novonastalog organizma meri se njegovim uspehom u životu. Na istim tim principima zasniva se i teorija genetskih algoritama.

Smatra se da je idejni tvorac genetskih algoritama Džon Holland (*John Holland*), koji je knjigom „*Adaptation in natural and artificial systems*“ [Hol 75] postavio temelje ove metode, a više i detaljnije o njoj može se naći u [Bäc 00a, Bäc 00b, Bea 93a, Bea 93b, Gol 89, Mic 96, Mit 99, Müh 97], a veoma su zastupljeni i u domaćoj literaturi [Čan 96, Fil 98, Kra 00, Toš 04].

Osnovnu konstrukciju kod genetskih algoritama predstavlja populacija jedinki, od kojih je svaka jedno potencijalno rešenje datog problema. Ukoliko je rešenje problema definisano uređenom n -torkom parametara (promenljivih), svaka jedinka definisana je vektorom od n elemenata, pri čemu svaki predstavlja jednu moguću vrednost konkretnog parametra. Analogno genetskom materijalu kod živih organizama, svaki od tih parametara, koji nosi jednu informaciju, naziva se *gen*, a uređena n -torka je *hromozom*. Genetski zapis svake jedinke predstavlja se *genetskim kodom*, koji predstavlja zapis vrednosti parametara (gena) u odgovarajućem obliku. U praksi se najčešće koristi binarno kodiranje, kod kojeg se genetski kod sastoji od niza bitova, mada

je u nekim slučajevima pogodno koristiti i sisteme veće kardinalnosti. Način kodiranja je veoma bitan za rešavanje problema, a neadekvatno kodiranje mže dovesti do loših rezultata bez obzira na ostalu strukturu algoritma.

Početna populacija se najčešće generiše na slučajan način, čime se doprinosi raznovrsnosti genetskog materijala, mada se u određenim slučajevima do boljih rezultata dolazi ako se početna populacija ili bar jedan njen deo generiše ciljano, primenom neke druge heuristike. Preduslov za korišćenje ovakvog pristupa jeste da vreme izvršavanja date heuristike bude relativno kratko, kao i da što manje smanjuje raznovrsnost genetskog materijala.

Nakon formiranja početne populacije, za svaku jedinku se određuje *funkcija prilagođenosti*, koja zapravo predstavlja ocenu kvaliteta te jedinke. Uzastopnom primenom operatora selekcije, ukrštanja i mutacije, genetski algoritam obezbeđuje da se iz generacije u generaciju (tj. iz iteracije u iteraciju) poboljšava apsolutna prilagođenost svake jedinke u populaciji, a time i srednja prilagođenost celokupne populacije. Ovim mehanizmom se u svakom koraku dobijaju sve bolja rešenja datog konkretnog problema, što znači da proces konvergira ka optimalnom rešenju.

Ukrštanje postojećih jedinki u cilju dobijanja naredne, bolje generacije vrši se primenom operatora selekcije, ukrštanja i mutacije.

Selekcija oponaša „zakon jačeg“ u prirodi tako što pri odabiru jedinki koje će ući u proces stvaranja naredne populacije favorizuje natprosečno prilagođene jedinke, čime one dobijaju veću šansu za reprodukciju, dok se slabije prilagođenim jedinkama šanse smanjuju, tako da one postepeno „izumiru“.

Operator ukrštanja vrši razmenu gena između dveju jedinki (roditelja), što doprinosi raznovrsnosti genetskog materijala i razmatranju novih rešenja u okviru prostora pretrage, čime se daje mogućnost da dobro prilagođene jedinke generišu još bolje potomstvo, odnosno još bolje prilagođene jedinke. Osim toga, relativno slabije prilagođenim jedinkama koje u sebi sadrže neke dobre gene

pruža se šansa da rekombinacijom dobrih gena proizvedu dobro prilagođene jedinke. Proces ukrštanja definisan je unapred zadatom vrednošću verovatnoće ukrštanja, koja određuje koliko jedinki učestvuje u ukrštanju, ali i koliko se jedinki bez modifikacija prenosi u sledeću generaciju.

Primena isključivo operatora selekcije i ukrštanja po pravilu dovodi do preuranjene konvergencije ka lošem lokalnom ekstremumu. Do toga dolazi drastičnim i uzastopnim gubljenjem genetskog materijala, zbog čega pretraga počinje da se lokalizuje i da se odvija u relativno uskoj oblasti a da sve veći regioni pretraživačkog prostora postaju nedostupni. Da bi se to sprečilo, mutacijom se vrši slučajna promena određenog gena, čime se omogućava vraćanje izgubljenog genetskog materijala u populaciju, ali i istraživanje novih regiona u prostoru pretrage. Zbog toga operator mutacije predstavlja osnovni mehanizam za sprečavanje preuranjene konvergencije genetskog algoritma ka lokalnom ekstremumu.

Osnovni koraci genetskog algoritma mogu se prokazati sledećim pseudokodom:

```
Unos ulaznih podataka;  
Kodiranje;  
Generisanje početne populacije;  
while not Kriterijum zaustavljanja GA do  
    for i=1 to Npop do  
        obj[i] = Funkcija cilja(i);  
    endfor  
    Funkcija prilagođenosti;  
    Selekcija;  
    Ukrštanje;  
    Mutacija;  
    endwhile  
    Štampanje izlaznih podataka;
```

Slika 2.1 Osnovni oblik genetskog algoritma.

Kao i kod drugih metoda optimizacije, uspešnost primene genetskog algoritma direktno zavisi od odgovarajuće formulacije datog problema i od primjenjenog sistema kodiranja. U opštem slučaju, matematički model optimizacije dat je u formi funkcije cilja i uslova ograničenja (2.1–4). Kako svaka jedinka u populaciji predstavlja jedno moguće rešenje problema, odnosno jednu uređenu n -torku promenljivih x_1, \dots, x_n , vrednost funkcije cilja za tu jedinku može se ujedno smatrati i merom njene prilagođenosti. Međutim, u praksi se pokazalo da ovakav pristup često daje loše rezultate, pošto dolazi do preuranjene konvergencije ka lokalnom ekstremumu umesto globalnog. Zato se uvodi *funkcija prilagođenosti*, koja u sebi pored funkcije cilja sadrži i stepen kršenja zadatih ograničenja.

2.6.1 Funkcija prilagođenosti i kaznene funkcije

Pošto se genetski algoritam primenjuje za optimizaciju bez ograničenja, neophodno je da se opisani matematički model sa ograničenjima prevede u model bez ograničenja. To se ostvarujem uvođenjem kaznene funkcije, koja je izvedena iz uslova ograničenja i svojom vrednošću opisuje stepen u kom razmtrana jedinka krši data ograničenja. Po načinu uvođenja u proračun, kaznene funkcije se generalno mogu podeliti na multiplikativne i aditivne.

Kod multiplikativnih kaznenih funkcija vrednost funkcije cilja $f_{(x)}$ date jedinke množi se kaznenim faktorom $P_{(x)}$, koji u slučaju problema minimizacije ima pozitivnu vrednost, čime se još više naglašava neprilagođenost te jedinke, odnosno:

$$F_{(x)} = f_{(x)} P_{(x)} \quad (2.9)$$

gde je

$$P_{(x)} \begin{cases} = 1, & \text{za zadovoljavajuće jedinke} \\ > 1, & \text{za nezadovoljavajuće jedinke} \end{cases} \quad (2.10)$$

U praksi se mnogo češće koriste aditivne kaznene funkcije, koje se, u slučaju minimizacije, dodaju vrednosti funkcije prilagođenosti nepovoljnih jedinki, čime se njihova neprilagođenost još više naglašava. Aditivne funkcije se dalje mogu podeliti na unutrašnje i spoljašnje.

Unutrašnje kaznene funkcije definišu se tako da im vrednost naglo raste kada se promenljiva x približi granici oblasti prihvativih rešenja:

$$F_{(x)} = f_{(x)} + \frac{1}{k} P_{(x)} \quad (2.11)$$

Spoljašnje kaznene funkcije najčešće imaju oblik:

$$F_{(x)} = f_{(x)} + kP_{(x)} \quad (2.12)$$

gde je, u slučaju minimizacije, za povoljno rešenje $P_{(x)} = 0$, a za nepovoljno je $P_{(x)} > 0$. U oba slučaja, k je kazneni parametar, a njegova pogodna vrednost određuje se probanjem ili se usvaja iskustveno .

2.6.2 Formiranje početne populacije

Ranije je vladao stav da početnu populaciju treba generisati nasumično, čime bi se obezbedila dovoljna raznolikost jedinki, što je potreban preduslov za uspešno pretraživanje celokupne oblasti definisanosti. Međutim, pokazalo se da je to tačno samo u slučajevima kada je prostor pretrage relativno mali. Kod problema sa većim brojem promenljivih i velikim prostorom pretrage, u kome postoji veći broj lokalnih ekstremuma, performanse genetskog algoritma često su osetljive i na kvalitet početne populacije.

Naime, „dobar kvalitet“ početne populacije ne zavisi samo od njene raznovrsnosti, nego i od vrednosti funkcije cilja njenih jedinki. Manjkavost u pogledu jednog ili drugog aspekta može dovesti do stvaranja slabog genetskog algoritma. Ako postoji početna populacija čije jedinke u proseku imaju bolju vrednost funkcije cilja, po pravilu se dobijaju bolji krajnji rezultati, ali postoji opasnost od rane konvergencije ka lokalnom ekstremumu, pošto će neki delovi prostora mogućih rešenja ostati neistraženi. S druge strane, prevelika raznovrsnost u populaciji može u procesu selekcije da dovede do gubitka kvalitetnih gena slabijih jedinki, a samim tim i do rane konvergencije genetskog algoritma.

Kompromisno rešenje, koje zadovoljava i kriterijum raznovrsnosti i kriterijum kvaliteta, postiže se tako što se jedan deo početne populacije (obično 40–50 %) generiše ciljano, tj. tako da sve jedinke zadovoljavaju, a ostale jedinke generišu se nasumično. Na taj način dobijaju se dobre polazne tačke za pretragu ali se ostavlja mogućnost čuvanja nasumično generisanih dobrih rešenja i gena.

2.6.3 Kodiranje

Svaka jedinka u populaciji određena je svojim hromozomom, koji predstavlja jedno moguće rešenje problema, odnosno jednu uređenu n -torku vrednosti promenljivih x_1, \dots, x_n . U praksi postoji više načina prevođenja podataka u genetski kod, od kojih se kao veoma pouzdano i primenljivo pokazalo binarno kodiranje, mada su u upotrebi i kodiranja primenom sistema veće kardinalnosti [Ant 89, BeD 93a, BeD 93b]. Kod binarnog kodiranja sve vrednosti promenljivih prevode se u zapis sačinjen od binarnih cifara 0 i 1. Ako je neki prirodan broj dat u binarnom sistemu kao

$$q_b = [a_n a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1] \quad (2.13)$$

gde su $a_i = 0$ ili 1 , $i = 1, \dots, n$, onda je odgovarajući zapis tog broja u dekadnom sistemu:

$$q_d = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} a_i \quad (2.14)$$

U slučaju diskretnih promenljivih, korisnik bira sistem mapiranja po kome se svakoj mogućoj vrednosti promenljive dodeljuje jedan od 2^{b_i} nizova (pointer). Shodno tome, dužina hromozoma iznosiće

$$c_i = mb_m + \sum_{i=1}^n b_i \quad (2.15)$$

gde je b_m broj bitova upotrebljenih za kodiranje svake od m promenljivih (za kontinualno promenljive) ili pointer (za diskrete promenljive). Obično je

$$\sum_{i=1}^n b_i = nb_v \quad (2.16)$$

gde je b_v broj bitova upotrebljenih za kodiranje pointer koji je dodeljen svakoj od promenljivih.

2.6.4 Operatori selekcije

Zadatak operatora selekcije je da izvrši odabir jedinki koje će učestvovati u postupku stvaranja nove generacije. Pri tome se vodi računa o tome da verovatnoća odabira neke jedinke mora da bude u skladu sa vrednošću njene funkcije prilagođenosti.

Najprostiji oblik operatora selekcije predstavlja prosta rulet selekcija. Ona je definisana tako da verovatnoća odabira neke jedinke bude direktno proporcionalna vrednosti njene funkcije prilagođenosti. Uzorak na kojem se vrši rulet selekcija često je suviše mali da bi se selektovani kodovi pojavljivali u odnosu u kojem su njihove funkcije prilagođenosti, tako da se dešava da dobre jedinke budu favorizovane više nego što je to poželjno. Zbog toga primena proste rulet selekcije obično dovodi do brzog gubitka genetskog materijala, a samim tim i do preuranjene konvergencije.

Jedan od načina za prevazilaženje pomenutog nedostatka jeste korišćenje selekcije zasnovane na rangiranju genetskih kodova prema njihovoj prilagođenosti. Funkcija prilagođenosti jedinke se bira iz unapred zadatog niza rangova, tako da zavisi samo od pozicije jedinke u populaciji. Na taj način, u slučaju velikih razlika među vrednostima funkcije cilja jedinki u populaciji, neke lošije jedinke mogu da dobiju šansu.

Turnirska selekcija je jedan od popularnijih operatora selekcije. Turniri zapravo predstavljaju simulaciju borbe za opstanak, a osmišljeni su kao takmičenja između jedinki populacije koje se nadmeću radi preživljavanja i učešća u sledećoj generaciji. Veličina turnira (N_{tur}) je broj jedinki koje učestvuju na turniru i ona predstavlja parametar turnirske selekcije. Ovaj parametar se najčešće zadaje unapred. Turnirska selekcija funkcioniše tako što se najpre na slučajan način biraju podskupovi od po N_{tur} jedinki, a zatim se u svakom podskupu bira najbolja jedinka koja učestvuje u stvaranju nove generacije. Ovaj postupak se ponavlja onoliko puta koliko je potrebno da se izaberu jedinke koje će učestvovati u ukrštanju.

Naročito je zanimljiv operator uniformne selekcije po prilagođenosti [Hut02], jer za razliku od drugih poznatih operatora omogućava očuvanje genetske raznovrsnosti a ne povećava po svaku cenu prosečnu prilagođenost celokupne populacije. Iako je ovakav pristup je u koliziji sa hipotezom o gradivnim blokovima i teoremom o shemama, u praktičnim primenama je pokazao veoma dobre rezultate, od kojih su neki prikazani u [Leg04].

Detaljan opis svih važnijih tipova selekcije može se naći u [Fil98, Fil06].

2.6.5 Operatori ukrštanja

Operatorom ukrštanja izvršava se razmena genetskog materijala jedinki koje su operatorom selekcije odabrane da budu roditelji novim jedinkama (potomcima). Razmena genetskog materijala najčešće se obavlja jednopozicionim, dvopozicionim, višepozicionim ili uniformnim ukrštanjem [Müh97].

Kod jednopozicionog ukrštanja, na slučajan način se biraju parovi roditelja iz populacije i broj koji predstavlja tačku ukrštanja, a koji je manji od dužine genetskog koda. Svi geni, počevši od pozicije tačke ukrštanja do poslednje pozicije u genetskim kodovima roditelja, međusobno menjaju mesta stvarajući pri tom dva nova potomka.

Operator dvopozicionog ukrštanja funkcioniše tako što se slučajno biraju dve tačke ukrštanja, a zatim se razmenjuju oni delovi genetskih kodova roditelja koji se nalaze između ovih pozicija.

Kod uniformnog ukrštanja se za svaki roditeljski par na slučajan način generiše „maska“, odnosno binarni niz iste dužine kao genetski kod. Roditelji zatim razmenjuju gene na svim pozicijama na kojima maska ima vrednost 0, dok na mestima gde maska uzima vrednost 1 roditelji zadržavaju svoje gene. Podrobniji opis operatora uniformnog ukrštanja može se naći u [Spe91].

Izbor operatora ukrštanja mora biti prilagođen prirodi problema koji se rešava. Naime, kada je potrebno delimično sačuvati strukturu genetskog koda koristi se jednopoziciono ukrštanje. U slučajevima kada je potrebno što više razbiti i izmešati blokove u genetskom kodu, koristi se dvopoziciono ili višepoziciono ukrštanje. Ako su geni nezavisni, onda najbolje rezultate daje uniformno ukrštanje. Za razliku od kodiranja i selekcije, gde korišćenje različitih pristupa može dovesti do bitnih razlika u performansama genetskog algoritma, kod ukrštanja su razlike mnogo manje, ali su ipak primetne.

2.6.6 Operatori mutacije

Mutacija je jedan od najznačajnijih operatora kod genetskih algoritama. Može se realizovati na različite načine, a često presudno utiče na tok izvršavanja algoritma. Najpoznatije varijante operatora mutacije su: prosta mutacija, mutacija pomoću binomne raspodele i mutacija pomoću normalne raspodele.

Kada se jedinke binarno kodiraju a populacija ne sadrži nekorektne jedinke, najčešće se koristi operator proste mutacije. Ovakav operator obrađuje genetski kod bit po bit, proveravajući pri tome da li je došlo do mutacije. Nivo mutacije predstavlja verovatnoću sa kojom svaki bit mutira, a zadaje se na početku izvršavanja algoritma. Pri tom se mora voditi računa da se za nivo mutacije odabere neka mala vrednost kako genetski algoritam ne bi prerastao u slučajnu pretragu. Prosta mutacija se, u nekim slučajevima, realizuje i preko binarnog niza koji se naziva maska. Maska se slučajno generiše za svaku jedinku, a predstavlja informaciju o tome na kojoj poziciji u genetskom kodu treba da dođe do promene gena. Poboljšanje proste mutacije se može ostvariti i korišćenjem takozvanih „zaledenih“ bitova. Primena binomne ili normalne raspodele može bitno da ubrza realizaciju operatora proste mutacije.

Mutacija pomoću binomne raspodele zasniva se na činjenici da slučajna promenljiva, koja predstavlja broj mutiranih gena jedinke, ima binomnu

raspodelu $B(N_{bit}, p_{mut})$, gde je N_{bit} dužina genetskog koda, a p_{mut} nivo mutacije. U genetskom kodu se na slučajan način bira tačno X_{mut} pozicija na kojima se izvršava mutacija. Kada je proizvod dužine genetskog koda i nivoa mutacije dovoljno veliki, pogodno je da se pomenuta binomna raspodela aproksimira normalnom raspodelom.

Kod mutacije primenom normalne raspodele za funkciju normalne raspodele određuje broj mutiranih gena X_{mut} , a zatim vrši mutacija. Varijanta ovog operatora za primenu na celoj populaciji je takođe razvijena, prvenstveno zato što se pri mutaciji genetski kodovi svih jedinki mogu statistički posmatrati kao jedna celina.

Detaljnije informacije o gore navedenim konceptima mutacije mogu se pronaći u [Kra00, Toš04, BeD93a, BeD93b].

2.6.7 Politika zamene generacija

Politika zamene generacija definiše koliki i koji deo postojeće populacije se zadržava i prelazi u narednu iteraciju proračuna. Najčešće se primenjuju sledeće strategije:

- **Generacijska**, koja u svakoj generaciji menja sve jedinke u populaciji.
- **Stacionarna**, koja u svakoj generaciji generiše samo deo populacije, dok se preostale jedinke prenose iz prethodne populacije.
- **Elitistička**, kod koje se bez primene genetskih operatora i računanja funkcije prilagođenosti, u svaku generaciju propušta određen broj elitnih jedinki, čime se skraćuje vreme izvršavanja algoritma i obezbeđuje čuvanje dobrih rešenja.

Pošto pored uštede procesorskog vremena i obezbeđuje i očuvanje kvaliteta rešenja, elitistička strategija ima prednost nad ostalim strategijama.

2.6.8 Kriterijum završetka pretrage

Izvršavanje genetskih algoritama, koji su u osnovi stohastičke metode pretrage dopustivog prostora rešenja, može trajati beskonačno dugo ukoliko im se ne nametne kriterijum zaustavljanja. Najčešći kriterijumi završetka genetskog algoritma su:

- dostignut maksimalni broj generacija,
- sličnost jedinki u populaciji,
- ponavljanje najbolje jedinke određeni (maksimalan) broj puta,
- dostizanje optimalnog rešenja ako je ono unapred poznato,
- dokazana optimalnost najbolje jedinke (ukoliko je to moguće),
- ograničeno vreme izvršavanja genetskog algoritma i
- prekid od strane korisnika.

Kriterijum završetka je najosetljivije mesto genetskih algoritama. Navedeni kriterijumi imaju dobre i loše strane, tako da se u praktičnim primenama kao najbolje pokazalo njihovo kombinovanje. Korišćenjem više kriterijuma zaustavljanja smanjuje se mogućnost loše procene prekida genetskog algoritma.

2.6.9 Prednosti i nedostaci genetskih algoritama

Efikasnost genetskog algoritma meri se njegovom pouzdanošću. Pošto je reč o stohastičkoj metodi, gde se o optimalnosti dobijenog rešenja može govoriti jedino uz određenu dozu verovatnoće, uobičajena je praksa da se isti problem reši nekoliko puta (obično u 10–50 navrata) pod istim uslovima, odnosno uz istu veličinu početne populacije i iste genetske operatore, pa da se zatim razmatra najbolja, najgora i srednja vrednost rešenja. Stoga je razvijen veliki broj funkcija za testiranje, koje imaju „nepovoljna“ svojstva u smislu definisanosti i broja lokalnih ekstremuma.

Najveća prednost genetskih algoritama ogleda se u tome što njegov rad u principu ne zavisi od definisanosti, konveksnosti i diferencijabilnosti funkcije cilja i uslova ograničenja. Za bolje strukturiran problem, optimalno rešenje će se pronaći brže, tj. sa manje generacija, i sa većom pouzdanošću, dok će slabije strukturirani problemi zahtevati više vremena i generacija. Međutim, upravo u tome je i njihov najveći nedostatak, pošto u većini slučajeva ne postoji nikakva veza između prirode problema i izbora genetskih parametara, tako da korisnik mora da se osloni na iskustvo ili da probanjem utvrdi odgovarajuću kombinaciju, što može predstavljati dug i zametan posao.

Najjednostavniji koncept genetskog algoritma, koji se sastoji od proste rulet selekcije, jednopozicionog ukrštanja i proste mutacije, naziva se prost genetski algoritam (*Simple genetic algorithm*) [Hil75]. Iako je najpričližniji hipotezi o gradivnim blokovima i teoremi o shemi [Hil75, Gol89], prost genetski algoritam u praktičnoj primeni pokazuje određene nedostatke. Naime, pri teorijskim razmatranjima veličina populacije se ne uzima u obzir pošto se smatra da populacija ima beskonačno mnogo članova, zbog čega se primenjuju tehnike iz teorije verovatnoće.

Međutim, u realnim situacijama, pogotovu kod problema kod kojih promenljive nisu kontinualne nego imaju diskretne vrednosti, populacija sadrži konačno mnogo jedinki, tako da primenom genetskih operatora selekcije,

ukrštanja i mutacije može doći do greške uzorkovanja. Ova greška može značajno da utiče na izvršavanje genetskog algoritma. U proseku, na velikom obimu uzorka broj potomaka svake jedinke približno je jednak očekivanom broju, ali su pojedinačno moguća velika odstupanja koja u nekoliko početnih generacija mogu presudno da utiču na kasnije performanse genetskog algoritma, prvenstveno na kvalitet dobijenog rešenja i brzinu konvergencije. To se najčešće manifestuje gubitkom genetskog materijala, preuranjenom i sporom konvergencijom.

Do pojave preuranjene konvergencije dolazi ako jedna ili više relativno dobrih (ali ne i optimalnih) jedinki postepeno preovladaju u populaciji pa zbog toga proces počne da konvergira ka lokalnom ekstremumu. U tom slučaju su mogućnosti genetskog algoritma poboljšanje datog rešenja veoma male.

Pošto selekcija i ukrštanje u populaciji sa istim jedinkama nemaju nikakav efekat, jedino bi mutacija – terijski gledano – mogla da doprinese izlazu iz date situacije. Međutim, zbog potpuno uništenog genetskog materijala u praksi je mutacija često bez efekata. Ukoliko je nivo mutacije relativno mali, promene genetskog materijala su neznatne, tako da dominantne jedinke vrlo brzo eliminišu sve ostale jedinke iz populacije. U suprotnom, ukoliko je nivo mutacije relativno veliki, genetski algoritam se pretvara u slučajnu pretragu.

Preuranjena konvergencija se najčešće javlja kod primene proste rulet selekcije. Ako u populaciji postoji jedinka sa relativno velikom funkcijom prilagođenosti, ona će najverovatnije istisnuti sve ostale jedinke iz populacije. Pri tome, ostale jedinke (čak i one sa malom funkcijom prilagođenosti) sadrže raznovrsne gene od kojih su neki možda i bolji u poređenju sa genima favorizovane jedinke, ali u procesu proste selekcije, zbog lošeg rasporeda dobrih gena po lošim jedinkama i konačne veličine populacije dolazi do eliminacije jedinki, a samim tim i dobrih gena iz populacije. Tako dobri geni gube šansu da se uz pomoć operatora ukrštanja i selekcije rekombinuju u dobre jedinke i time poboljšaju rešenje.

Spora konvergencija je problem koji je suprotan preuranjenoj konvergenciji. Do nje obično dolazi u kasnijoj fazi izvršavanja prostog genetskog algoritma. Ukoliko nije dostignuto optimalno rešenje a populacija je postala dovoljno slična, srednja prilagođenost svih jedinki u populaciji je velika, dok su razlike između najbolje jedinke i ostalih jedinki u populaciji male. Tada u funkciji prilagođenosti ne postoji dovoljan gradijent koji bi pomogao genetskom algoritmu da se u dostažnom broju generacija približi optimalnoj vrednosti.

Performanse genetskog algoritma često su osetljive i na kvalitet početne populacije. „Dobar kvalitet“ početne populacije zavisi i od vrednosti ciljne funkcije jedinki u populaciji i od raznovrsnosti populacije. Gubitak u pogledu jednog ili drugog može dovesti do stvaranja slabog GA. Ako postoji početna populacija čije jedinke u proseku imaju bolju vrednost funkcije cilja, po pravilu se dobijaju bolji krajnji rezultati, ali postoji opasnost od rane konvergencije ka lokalnom ekstremumu. Međutim, i previsoka raznovrsnost u populaciji može u procesu selekcije da dovede do gubitka kvalitetnih gena slabijih jedinki, a samim tim i do rane konvergencije.

Pored toga, raznovrsnost genetskog materijala nije jednaka u svim fazama izvršavanja genetskog algoritma, tako da unapred fiksirane i nepromenljive vrednosti genetskih parametara mogu dovesti do prespore ili prebrze konvergencije ili do neodgovarajućih rešenja.

Optimalne – ili bar poželjne – vrednosti nivoa ukrštanja ili mutacije menjaju se tokom izvršavanja genetskog algoritma [Brm91, Bēc92, Bēc93, Sri94], pa je zato preporučljivo koristiti promenljive parametre, koji se mogu generalno podeliti u dve kategorije:

- *parametri s fiksnom promenom*, kod kojih se unapred zadaje linearno ili eksponencijalno povećanje ili smanjivanje vrednosti parametara, i
- *adaptivni (samoprilagođavajući) parametri*, koji menjaju svoju vrednost u zavisnosti od toga kakve je rezultate operator do tada dao, odnosno koliko je bio uspešan.

Kako tempo procesa konvergencije zavisi od unapred zadatih ulaznih parametara, kao što su veličina početne populacije i kvalitet nasumično generisanih jedinki u njoj, njegov tok se samo donekle može predvideti. Upravo zato se na velikom broju primera pokazalo da parametri s fiksnom promenom daju bolja rešenja nego konstantni ali da su samoprilagođavajući parametri ipak podesniji, pre svega zato što se prilagođavaju trenutnom stanju konvergencije i stepenu prilagođenosti svake jedinke zasebno [Coi96, Nan01, Coe00, Bar03, Kav04].

3. Energetski efikasni objekti

U procesu ovladavanja prirodom, čovek je ujedno i uništavao prirodne resurse i ugrožavao životnu sredinu. Nagli industrijski razvoj uveliko je doprineo bržem uništavanju prirodnih resursa. Ukoliko se nastavi ovakvim tempom razvoja i industrijalizacije, postavlja se pitanje dokle će resursi naše planete moći da potraju, jer se količine hrane, vode, obradivog zemljišta, izvora energije i sirovina neprestano smanjuju.

Koristeći prirodne resurse i oblikujući ih prema svojim potrebama, čovek je opstajao i razvijao se kao kulturno, socijalno i duhovno biće. Međutim, razvoj različitih tehnologija olakšao je život savremenom čoveku ali je doveo do bržeg iskorišćavanja njegove okoline i bržeg iscrpljivanja resursa. Stoga treba imati u vidu da upravljanje prirodnim resursima, kao jedna od ključnih komponenti održivog razvoja, omogućava racionalne ekomske, ekološke i socijalne efekte. Sa ekološkog stanovišta, osnovni cilj upravljanja prirodnim resursima, pogotovo kada su u pitanju obnovljivi izvori energije, jeste težnja da se njihovom eksploatacijom ne narušavaju prirodni procesi niti da dolazi do zagađenja ekološkog sistema. Sa ekomske tačke gledište, upravljanje prirodnim dobrima podrzumeva i prilagođavanje sistemskim merama i tržišnim uslovima na nivou države [Vol 05].

Obezbeđenje dovoljnih količina energije predstavlja jedan od ključnih uslova za opstanak i razvoj naše civilizacije. Stoga nije neobično da se u prognozama ekonomskog razvoja bilo koje zemlje, najveća pažnja posvećuje problemima snabdevanja energijom, i to prvenstveno sa stanovišta energetske efikasnosti, ekomske opravdanosti i ispunjavanja ekoloških zahteva.

Prirodni resursi se u zavisnosti od mogućnosti regeneracije tokom upotrebe načelno mogu podeliti u dve kategorije, na obnovljive i neobnovljive resurse. Iako obnovljivi resursi po definiciji imaju izvesnu moć regeneracije, ukoliko se brže eksploatišu brže nego što se obnavljaju može doći do njihovog iscrpljivanja. Neobnovljivi resursi se ne mogu obnoviti prirodnim putem, tako da

usled dugotrajnog iskorišćavanja može doći do njihovog trajnog iscrpljivanja [San 08]. Upravo zato se prirodni resursi kao što su obradivo zemljište, tlo i sve što se nalazi na njemu i u njemu, svi oblici vodnih resursa, vazduh i biodiverzitet, moraju koristiti na odživ način [Man 02]. Održivo korišćenje prirodnih resursa podrazumeva strogo planiranje i upravljanje postojećim rezervama u smislu potreba priverdnog razvoja. Efikasno upravljanje i kontrolisanje predstavlja ključ za ostvarivanje održivog korišćenja prirodnih resursa. Što se neobnovljivih resursa tiče, veoma je važan savremeni pristup u oblasti njihovog održivog korišćenja, a uglavnom se smatra da je njihovo održivo korišćenje nemoguće [RS 11].

Energetska efikasnost je skup termina kojima se opisuje razumno i kvalitetno korišćenje energije i stoga se ne sme posmatrati samo u kontekstu štednje, jer štednja uvek podrazumeva određena odricanja, dok efikasna upotreba nikada ne narušava uslove života i rada. Stoga se može reći da energetska efikasnost znači izbegavanje nepotrebnog gubitka energije bez narušavanja komfora, životnog standarda ili ekonomске aktivnosti i može se realizovati kako u oblasti proizvodnje tako i potrošnje energije [Mar 10].

Energetska efikasnost igra ključnu ulogu ne samo sa stanovništa ekonomskog razvoja, nego i u domenu rešavanja mnogih važnih problema životne sredine. U procesu prilagođavanja energetske efikasnosti zahtevima zaštite životne sredine prioritet je da se što je pre moguće otpočne sa promenama koje ne zahtevaju izrazito visoka ulaganja. Da bi se to ostvarilo, neophodno je iskoristiti sve raspoložive mogućnosti koje se odnose na racionalnu potrošnju energije i postepeno uvođenje alternativnih izvora energije, kao i prilogođavanje cene energije njenoj stvarnoj ekonomskoj vrednosti. U cilju ostvarenja planirane uštede energije racionalnom potrošnjom, nužna je adekvatna primena relevantnih direktiva EU u pogledu efikasnije proizvodnje i racionalnije upotrebe energetika.

Da bi se pristupilo rešavanju ovog problema koji je od životne važnosti za opstanak ljudske rase na Zemlji, neophodno je prvo promeniti svest i navike ljudi i okrenuti se održivim metodama privređivanja i reciklaži. Sa resursima treba postupati štedljivije (pogotovo sa hranom i vodom) jer ih je sve manje.

Osmišljene su savremene metodologije, a to su standardi, modeli i dr. koje uslovjavaju uvođenje kontrole kvaliteta, efikasnije poslovanje, racionalnije korišćenje prirodnih resursa i očuvanje životne sredine.

Najstariji zapisi koji bi se danas mogli kvalifikovati kao bavljenjem problemom održivosti i životnoj sredini potiču iz Mesopotamije, a vezani su za složen melioracioni sistem koji je s vremenom doveo do porasta saliniteta a time i do degradacije gornjeg sloja zemljišta i ugrožavanja useva, budući da se smanjenje prinosa nije moglo kompenzovati prebacivanjem na druge biljne vrste manje osetljive na so. Starogrčki mislioci su raspravljali o čovekovom mestu u prirodi i njegovoj ulozi u osiromašenju prirodnih sistema. Platon je uočio da šume na teritoriji Atike nestaju kao rezultat ljudskog delovanja i da to ostavlja ozbiljne posledice na žitelje tog područja ukazujući na tesnu povezanost između porasta populacije, raspoloživosti prirodnih resursa i ukupne površine obradive zemlje. Rimski geograf Plinije Stariji opisao je slučajeve nepravilne eksploatacije prirodnih resursa i kako je krčenje čitavih šuma dovelo do erozije, poplava, formiranja močvara i smanjenja plodnosti tla.

Intenzivan razvoj rudarstva u srednjem veku privukao je pažnju značajnih misilaca tog vremena. Nemački inženjer rudarstva Georgijus Agrikola je u XVI veku u svojim delima skretao pažnju na ekološke aspekte rudarstva i na činjenicu da je za prozvodnju čumura, koji se koristio za topljenje rude, potrebno čak i do pet puta više drveta, što posledično dovodi do ugrožavanja šumskih resursa i štetnih posledica na okolinu. Agrikola je ukazao i na problem trovanje ribe u rekama zbog ispuštanja ostataka procesa topljenja rude u vodu. Još tada se postavljalo pitanje mogu li rudni depoziti u nekom trenutku da budu iscrpljeni, ali se gotovo do početka XIX vijeka zadržala zabluda da se ruda može regenerisati ako se u zemlji ostave manje količine, kao što na posečenom stablu niknu izdanci.

Početak ekološke svesti u naučnom smislu vezuje se za postavljenje prvih teorija o životnoj sredini u drugoj polovini XVIII veka, među kojima su najznačajnije bile teorija bentamista, teorija maltuzijanstva, teorija granice rasta, teorija globalne ravnoteže, teorija organskog rasta, teorija preobražaja međunarodnog poretku, teorija postojanog stanja, teorija nivoa života, teorija

postindustrijskog doba, teorija decentralizacije društvenog sistema, teorija globalnog matematičkog modela biosfere, teorija ekološke politike, teorijske postavke ekoloških dimenzija i mnoge druge. Tada se prvi put pominje i pojam održivosti, i to kao „održivi prinos“ („*sustained yield*“), što je engleski prevod nemačkog termina „*nachhaltiger*“, koji je gotovo dva veka predstavljao osnovnu doktrinu šumarstva budući da je zbog naglog razvoja rudarstva i industrije došlo do prekomerne potrošnje drveta i da bi se to svelo na razumne razmere u Nemačkoj se prvi put šumarstvo pojavljuje kao institucionalizovana, organizovana i zakonski regulisana delatnost.

Početkom savremenog poimanja održivog razvoja i međunarodnog prihvatanja tog pojma smatra se izlazak knjige *Granice rasta* 1972. godine, koju je objavila grupa autora poznata kao Rimski klub. Autori su primenom računarskog modeliranja došli do zaključka da bi rapidan ekonomski porast u sadejstvu sa eksponencijalni porastom stanovništva mogao dovesti do ozbiljnih problema na globalnom nivou, među kojima su najznačajniji bili poremećeni odnosi između stanovništva različitih delova planete, industrijalizacija, zagadenje životne sredine i iscrpljenje prirodnih resursa [Unk 12].

Prekretnicom u odnosu čovečanstva prema životnoj sredini smatra se Prva konferencija Ujedinjenih nacija o životnoj sredini, održana 1972. u Stokholmu, na kojoj je zauzet opšti stav da se životna sredina ne može očuvati i unapređivati zasebnim politikama i parcijalnim merama, nego implementacijom koncepta održivog razvoja na međunarodnom nivou, te je u tom cilju inicirano osnivanje Programa Ujedinjenih nacija za životnu sredinu, UNEP. Međunarodno udruženje za zaštitu životne sredine i prirodnih resursa je 1980. godine objavilo strategiju zaštite životne sredine, u kojoj se kao osnovni zadatak postavlja ostvarivanje održivog razvoja kroz zaštitu prirodnih resursa, koji je kasnije preuzela i Svetska komisija za životnu sredinu i razvoj, poznatija pod nazivom *Brundtendova komisija*, kada je 1987. godine objavila izveštaj pod nazivom „Naša zajednička budućnost“ [UN 87]. Evropska unija je usvojila koncept održivog razvoja 1990. godine, a Ujedinjene nacije 1992. godine na Drugoj Konferenciji Ujedinjenih nacija o životnoj sredini održanoj u Rio de Žaneiru, jada su usvojena dva važna dokumenta – Okvirna konvencija UN o klimatskim

promenama [UN 92a], Konvencija o biološkom diverzitetu [UN 92b]. Godinu dana kasnije osnovana je Komisija UN za održivi razvoj sa prvenstvenim ciljem da nadgleda sprovođenje pomenutih dokumenata i drugih akata.

Jedan od ključnih dokumenata usvojenih na samitu u Rio de Žaneiru jeste Agenda 21 [UN 92c], odnosno deklaracija o namerama i obavezivanje na održivi razvoj u XXI veku, kojom su putem globalnog akcionog programa održivog razvoja predviđene aktivnosti na svim nivoima i to ne lokalnom, nego na svetskom nivou. Program se sastoji od četrdeset poglavlja podeljenih u četiri celine, koja se bave svim nivoima organizacije društva od nacionalnih i lokalnih vlasti do nevladinih organizacija i drugih zajednica, pri čemu se svako poglavlje sastoji od četiri dela: osnovna akcija, ciljevi, aktivnosti i sredstva za realizaciju. Agenda 21 daje preporuke za održivo upravljanje vodom, zemljištem, šumama i svim ostalim prirodnim resursima, i to na lokalnom, nacionalnom i međunarodnom nivou, pri čemu države treba da poštuju međunarodni sporazum, a da se jedinicama lokalne uprave omogući izrada akcionih planova održivog razvoja i uspostavljanje partnerskog odnosa između građana, lokalne vlasti, privrede i nevladinih organizacija.

Kjoto protokol [UN 97] je međunarodni sporazum koji je usvojen 1997. godine u Kjotou (Japan), a stupio je na snagu osam godina nakon usvajanja, 16. februara 2005. godine. Glavnu osobenost ovog protokola predstavlja set ciljeva za 37 industrijalizovanih zemalja i EU kako bi se emisija štetnih gasova smanjila u proseku za 5 % u odnosu na nivo iz 1990. godine u petogodišnjem periodu od 2008. do 2012. godine. Nove obaveze Kjoto protokola usvojene su u Dohi 2012. godine, čime su zemlje potpisnice preuzele na sebe obavezu da se u periodu od 2013. do 2020. godine emisija štetnih gasova smanji za 20 % u odnosu na 1990. godinu. Do sada su ovaj sporazum ratifikovale 192 države [EU 15]. Zanimljiv je podatak da SAD kao najveći izazivač efekat staklene baštne nisu potpisale protokol jer su mišljenja da bi potpisivanje protokola negativno uticalo na njihovu celokupnu ekonomiju [Set 08].

Energetska efikasnost je posebno značajna kao ekonomski delotvoran način postizanja ciljeva predviđenih Kjoto protokolom u pogledu smanjenje emisije ugljen-dioksida, te je stoga postala sastavni deo direktiva razvoja svih

sektora energetskog sistema. U sektoru proizvodnje nafte, naftnih derivata i prirodnog gasa energetska efikasnost ogleda se u modernizaciji rafinerija i korišćenju naprednih tehnologija za eksploataciju naftnih bušotina i nalazišta gasa. U elektroenergetici se energetska efikasnost postiže korišćenjem efikasnijih tehnoloških procesa kao što su napredne tehnologije sagorevanja uglja, elektrane na gas visokog stepena efikasnosti, smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži, upotreba naprednih informaciono-komunikacionih tehnologija u nadzoru i upravljanju, gradnjom elektrana u blizini mestima najveće potrošnje i sl. U proizvodnji toplotne energije energetska efikasnost obuhvata razvoj centralizovanih toplotnih sistema u cilju povećanja delotvornosti pretvaranja energije iz jednog vida u drugi, smanjenju gubitaka u procesu distribucije toplotne energije i upotrebi obnovljivih izvora energije.

Procenjuje se da energija koja se troši u stambenim i poslovnim zgradama predstavlja 40 % ukupnog utroška energije u Evropi [EU 01]. Jedna od inicijativa Evropske zajednice u cilju smanjenja potrošnje energije u zgradama u javnom sektoru jeste poboljšanje energetskih performansi postojećih objekata počev od 2018. i projektovanje energetski efikasnih objekata počev od 2020 [EU 04, EU 10]. Smanjenje potrošnje energije i uticaja na okolinu takođe su među ključnim merama u cilju efikasnog korišćenja energije i smanjenja efekata staklene baštne predviđenim Kjoto protokolom [UN 98]. Mnogi istraživači su se bavili iznalaženjem tehnoloških rešenja na nivou naselja [Sal 15, Pus 14] ili pojedinačnih objekata [Bur 11, Gug 07, Can 15], u domenu ukupnih energetskih performansi zgrada [Asd 13, DeL 15, Eva 14], performansi u togu čitavog životnog veka objekata [Ram 10] i njihovog uticaja na okolinu [13], kao i mogućnostima unapređenja energetskih performansi postojećih i istorijskih objekata [Pag 15, Mur 13, Aro 15, Mur 15].

Zelena gradnja je takav način izgradnje gde se postiže da objekat koji se izgradi tokom svog životnog veka troši manju količinu vode, postiže minimalnu potrošnju električne energije iz obnovljivih izvora, koristi prirodne materijale za izgradnju ili materijale dobijene reciklažom. Na ovaj način, objekat je isplatljiviji, a život u njemu i jeftiniji i zdraviji. Zabrinutost zbog nedostatka vode za piće, zbog velikog trošenja el.energije, i ugrožavanje planete Zemlje emisijom štetnih

gasova, zbog velikog nagomilavanja deponija i otpada, koji zagadjuju zemlju unistavajući prirodne resurse, zbog korišćenja materijala koji se ne razgradjuju, a nedovoljno koristeći obnovljive izvore energije, svest ljudi je počela da se menja i iznalazi načine kako to ispraviti ili ublažiti. Jedno od mogućih rešenja u gradjevinarstvu je uvesti nove standarde, pored postojećih, a to su tzv. zeleni standardi.

3.1 Standardizacija zelenih zgrada

Da bi održivost zgrada imala tržišnu vrednost, neophodan je standardizovani sistem procene svojstava objekata u odnosu na životnu sredinu. Standardi održive gradnje se zasnivaju na metodologiji, postupcima i indikatorima za utvrđivanje ekoloških karakteristika koje određuju mreže istraživačkih instituta i agencija. Iako većina evropskih zemalja ima svoje lokalne standarde i pravilnike, koji su u većoj ili manjoj meri usaglašeni sa direktivama i regulativama EU, internacionalizacija tržišta i sve veći broj projekata u međunarodnom partnerstvu s vremenom su doveli do potrebe za univerzalnim standardom koji bi bio primenljiv na evropskom i svetskom tržištu. Iako među razvijenijim članicama EU postoji izvesna doza netrpeljivosti i trvanja u pogledu toga čija je regulativa bolja i ko će se kome prikloniti, s vremenom su se istakla četiri standarda kao dominantna u međunarodnim projektima na teritoriji Evrope, a to su: BREEAM (Velika Britanija), LEED (Sjedinjene Američke Države), HQE (Francuska) i DGNB (Nemačka).

3.1.1 BREEAM standard

BRE Group (*Building Research Establishment Group*) je jedinstvena, konsultantska agencija i organizacija za testiranje zasnovana na istraživanju, koja nudi ekspertizu u skoro svakom segmentu izgrađene sredine i povezanih industrija i pomaže klijentima da realizuju kvalitetnije, sigurnije i ekološki odgovornije proizvode, objekte, urbane sredine i poslovanje, a podržava i inovacije i pilot-projekte u cilju postizanja unapređenja ovakvih rezultata. U okviru ove grupe nalazi se i BRE Global, kao nezavisno telo ovlašćeno od strane Britanske agencije za standardizaciju (UK Accreditation Service – UKAS) i pruža usluge sertifikovanja objekata i proizvoda u oblasti zaštite od požara, o stepenu sigurnosti, nivou zelene gradnje i nivou održivih proizvoda i usluga na međunarodnom tržištu. BRE Global je nezavisna organizacija koja je formirala BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment*) standard za sertifikovanje objekata zelene gradnje. Ovu organizaciju i njen rad

sa BREEAM standardom nadgleda nezavisno revizorsko telo, koje je zaduženo za proveru korektnosti, ispravnosti i nezavisnosti svakog aspekta rada. Testiranje i odobrenje proizvoda vrše priznati stručnjaci u renomiranim laboratorijama za ispitivanje.

BREEAM je zapravo protokol koji određuje standarde za najbolju praksu u održivom dizajnu i merilo za opisivanje ekoloških, energetskih i održivih performansi neke građevine. Protokol je osmišljen tako da ga je moguće primeniti na bilo koju vrstu objekata, projektovanog ili izgrađenog, i na bilo kojoj lokaciji na svetu, što znači da obuhvata najširi dijapazon objekata od stambenih, preko poslovnih, do komercijalnih i kulturno-obrazovnih ustanova, objekata zdravstva itd. Prva verzija protokola osmišljena je krajem osamdesetih godina dvadesetog veka u Velikoj Britaniji, ali je zvanično prvi put objavljen 1990. godine, kao prvi sistem za sertifikovanje poslovnih zgrada u Ujedinjenom Kraljevstvu. Od tada do danas do danas ima milion registrovanih projekata za ocenjivanje, a sertifikovano je preko 200 000 građevina.

BREEAM protokol predstavlja sveobuhvatni pristup svim delovima i detaljima procene projekata i obejkata, njihovog odnosa i uticaja na životnu sredinu i korisnike, a zastupljen je u mnogim evropskim zemljama, nekoliko afričkih i azijskih i u Severnoj Americi i Australiji. Postoji više opcija obuke profesionalaca za primenu BREEAM standarda, a izbor tipa licence za BREEAM međunarodnog procenitelja zavisi isključivo od vrste građevine koja se ocenjuje. Posebna kategorija BREEAM ovlašćenog profesionalca je namenjena iskusnim inženjerima koji imaju predznanje iz održivog dizajna i procesa projektovanja, ali nemaju dovoljno detaljno poznavanje specifičnog protokola.

BREEAM šeme za procenu projekata/objekata osmišljene su kao tehnički dokumenti koji omogućavaju kvalifikovanom i licenciranom procenitelju da izvrši procenu, a podeljene su na nekoliko faza u odnosu na životni ciklus konstrukcije i izgrađene sredine, a to su: faza planiranja (*BREEAM Communities*), faza izgradnje novih objekata (*BREEAM New Construction*) i faza korišćenja i eksploracije objekta (*BREEAM In Use*).

BREEAM Standard je podeljen tako da, u odnosu na stadijum pristupanja projekta procesu sertifikacije, postoje nivoi sertifikata. Tokom izrade idejnog i glavnog projekta koristi se tzv. *Pre-Assessment Tool*, kojim se već u najranijoj fazi projektovanja objekat može usmeriti prema preporukama standarda. Koristi se kao interna ocena ili preliminarni sertifikat za kreiranje novih objekata, na objektima dogradnje ili kod većih obnova.

Nakon dobijanja građevinske dozvole i sa početkom izvođenja objekta prelazi se na proces sertifikacije nove konstrukcije gde se, ukoliko je postojao prethodni proces ocenjivanja, sada mogu pratiti detalji izvođenja, a ukoliko ga nije bilo, onda su promene na objektu u cilju prilagođavanja standardu prilično sužene, budući da je izostala faza planiranja kada se većina eventualnih problema mogla rešiti.

Tokom perioda korišćenja gotovog objekta može se dodeliti sertifikat o postognutim projektovanim merama na osnovu procene i praćenja funkcionisanja celokunog objekta.

Fundamentalni deo celog sistema bodovanja leži u usklađenosti sa principima održivog razvoja koji su okarakterisani kao odmeravanje skupa uticaja nekog objekta na životnu sredinu. Kod BREEAM standarda ovi uticaji su podeljeni u devet segmenata, koji su nastali kao kombinacija konsenzusa kriterijuma prema mišljenju stručnog tima. Kriterijumi prema kojima se vrši ocenjivanje objekata podeljeni su u devet kategorija: energija, upravljanje, zdravlje korisnika, voda, materijali, otpad, zagađenje, pejzažni aspekt i ekologija, transport. Dodatna kategorija je inovacija u projektovanju, koja treba da istakne novine nekog objekta koje nije bilo moguće oceniti ili uvrstiti u postojećem sistemu procene. Ova kategorija predstavlja način podsticanja razvoja, odnosno doprinos arhitektonskoj i inženjerskoj praksi, jer svaka građevina koja nadmaši propisane i očekivane standarde zaslužuje posebnu pažnju. Svaka od kategorija predstavlja grupu srodnih uslova koje objekti treba da zadovolje, što se opisuje kao minimalni zahtevi i dodatne preporuke, odnosno uputi koji, ukoliko se primene, obezbeđuju više poena za određenu celinu i višu ukupnu ocenu objekta.

BREEAM standardi obuhvataju sledeće kategorije:

- **Energija** je najobimnija kategorija za projekte novih objekata i zauzima najveći deo procentualne podele za ocenjivanje, odnosno 19%. U ovom delu se obrađuju pitanja kao što su redukcija emisije gasova staklene bašte, sistemi za praćenje potrošnje energije, osvetljenje, niskoemisione tehnologije i energetski prihvativljivija oprema, energetski efikasni sistemi za grejanje, provetrvanje i hlađenje prostora, način kontrole vlažnosti prostora i efikasni sistem transporta.
- **Upravljanje objektom** sa svojih 12% predstavlja bitan reper prilikom sertifikovanja, a obuhvata pitanja snabdevanja objekata, primenu odgovorne građevinske prakse, uticaj gradilišta na okolinu, učešće zainteresovanih strana, troškove celokupnog životnog ciklusa objekta i rešenja koja su primenjena pri planiranju tih procesa.
- **Zdravlje i blagostanje korisnika** učestvuje sa 15% u konačnoj oceni, a obrađuje različite vrste komfora koji su postignuti u objektu, a to su vizuelni, topotni komfor, kvalitet vazduha u prostorijama, kvalitet vode koja se koristi u objektu, akustičke performanse, sigurnost i pouzdanost objekta.
- **Transport** ima ukupno učešće od 8% i tiče se dostupnosti javnog prevoza, pogodnosti blizine lokacije u odnosu na ključne tačke u okolini, postojanje mesta i prostora za biciklistički saobraćaj, maksimalni kapacitet parking prostora za vozila i plan putovanja korisnika objekta, kako bi se ohrabrili da koriste alternativne vidove prevoza i izbegli opcije koje imaju naveći negativan uticaj na žitovnu sredinu.

- **Kvalitet vode** čini 6% ukupnog broja bodova i okuplja pitanja načina i sistema korišćenja vode, praćenje i merenje potrošnje, prevenciju i utvrđivanje gubitaka vode i primenu efikasne opreme koja smanjuje ukupnu potrošnju vode.
- **Materijali** imaju 12,5% učešća kao kategorija u kojoj se razmatra uticaj životnog ciklusa svakog materijala koji je upotrebljen za građenje bilo kog dela objekta, što podrazumeva način dobijanja sirovine, zatim proizvodnje, transporta i ugradnje, eventualne popravke i konačno mere ukljanjanja, ponovne upotrebe i uništavanja materijala i proizvoda. Uzimaju se u obzir i materijali za parterno rešenje okoline objekta i zaštitne granice lokacije, odgovorni princip nabavke materijala, izolacija i projektovanje za robusnost.
- **Otpad** je kategorija koja se bavi upravljanjem i rešenjima za odlaganje otpada i nosi 7,5% ocene. Otpad je podeljen na konstruktivni, odnosno onaj koji se stvara tokom procesa izgradnje objekta i način upravljanja i odlaganja istog, kao i na otpad koji se svakodnevno stvara tokom upotrebe objekta. To uključuje i upotrebu recikliranih materijala i agregata, spekulativne podne i plafonske površine.
- **Zagađenje** kao kategorija sa svojih 10% ispituje kako su projektanti smanjili i zaštitili okruženje od različitih vrsta zagađenja. Negativni uticaj opreme za rashadživanje, rešanja i prevencija oticanja vode sa različitih površina objekta i lokacije ka kanalizacionim odvodima, redukcija svetlosnog zagađenja, ublažavanje buke koju objekat može da proizvede i primena šedljivih alternativnih vidova hlađenja ili grejanja, čiji se procesi pretvaraju u ciklične sa maksimalnim iskorišćenjem svakog produkta procesa.

- **Ekologija i način korišćenja zemljišta** takođe ima 10% učešća u celokupnom sistemu bodovanja građevine. U ovoj kategoriji poeni se dodeljuju za primenjena rešenja pri odabiru lokacije, ekološke vrednosti lokacije i sprovođenje sistema zaštite specifičnosti lokacije. Povećanje svesti o ekologiji mesta građenja i dogoročne prognoze uticaja na biodiverzitet, zajedno sa smanjenjem uticaja na sredinu, spadaju u problematiku ove kategorije.
- **Inovacije i nova dostignuća** svakom objektu mogu doneti 10 dodatnih bodova na ukupnu ocenu, čime se neki propusti u ostalim kategorijama mogu nadomestiti. Ova dopunska kategorija osmišljena je tako da se nesvakidašnji i nestandardni uspesi nagrade iako nisu obuhvaćeni nekom od ranije definisanih kategorija, što je podsticaj za napredak svih učesnika u procesu projektovanja, izgradnje, eksploatacije i upravljanja objekta, tako da ti uspesi postanu smernice za buduće projekte.

Licencirani procenitelj u procesu procene uzima u obzir podatke koje je prikupio o datom objektu, a zatim na osnovu osobina koje objekat poseduje i ispoljava dodeljuje broj poena za svaku od kategorija. Potom se u odnosu na ukupni broj mogućih poena za datu kategoriju iskazuje procentualna zastupljenost postignutog rezultata. Taj procenat se množi sa odgovarajućim procentom koji nosi kategorija u okviru njenog učešća u celokupnom sistemu sertifikacije da bi se dobio ukupan rezultat za taj odeljak. Ovaj proces se sprovodi za svih deset kategorija i jednostavnim zbirom svih procenata se dobija ukupan rezultat. Tada procenitelj formira dokumentaciju, predaje na reviziju Agenciji, Savetu ili drugoj ovlašćenoj organizaciji i ukoliko se rezultat procene uklapa u propisane nivoe, izdaje se adekvatan sertifikat o postignutom uspehu i usklađenosti sa BREEAM standardom.

BREEAM sistem bodovanja i ukupnog rezultata za dobijanje sertifikata omogućava da se na osnovu ukupnog učinka dodele sertifikati: izuzetan (*outstanding*, više od 85% ukupnog učinka); odličan (*excellent*, sa više od 70%), vrlo dobar (*very good*, sa više od 55%), dobar (*good*, sa više od 45%), dovoljan (*pass*, koji predstavlja minimalne uslove koje objekat treba da zadovolji, odnosno svega 30%). Ukoliko se to objekat ne dobije prelaznih 30%, onda ne može da bude sertifikovan, odnosno dobija status „van kategorije“ (*unclassified*).

Iz navedenog se vidi da proces procene objekta korišćenjem BREEAM standarda je ništa drugo do upoređivanje osobina objekta u odnosu na šeme i kriterijume koje koristi ovlašćeni BREEAM procenitelj. Postoji i jedinstvena baza podataka svih sertifikovanih objekata, gde se mogu proveriti svi potrebni podaci neophodni za određeni objekat. Nakon što je objekat dobio sertifikat o ispunjenosti uslova koji su bili predviđeni tokom projektovanja, postoji obaveza da ti objekti, odnosno njihova uprava ili menadžeri, i tokom perioda korišćenja putem posebnog programa prate, koriguju i zadrže postignuti nivo sertifikata do kraja životnog ciklusa objekta. Na taj način podiže se svest o brizi za okolinu i kreira jedinstveni krug uzornih građevina, koje treba da posluže kao reperi za dalji razvoj industrije, arhitekture, inženjerstva i društva u celini. [Uze 12a].

3.1.2 LEED standard

USGBC (*US Green Building Council*) je neprofitna organizacija lidera iz svih sektora građevinske industrije. Osnovana je 1993. godine, a sada ima više od dvadeset hiljada članova. Osnovni cilj postojanja ovog saveta jeste promovisanje i omogućavanje ekonomske i ekološke održivosti putem informisanja i usmeravanja zajednice ka zelenoj gradnji. S tim ciljem formiran je LEED standard, što je skraćenica od *Leadership in Energy and Environmental Design* (Vođstvo u energetski efikasnoj i održivoj gradnji), a koji definiše propise za gradnju održivu sa aspekta potrošnje energije i prirodnih resursa, društvene odgovornosti i profita.

USGBC je začetnik globalne međunarodne mreže GB saveta (*Green Building Council*). U okviru nacionalnih GB saveta širom sveta uspostavljena su nezavisna sertifikaciona tela poznata kao GBC instituti (GBCI – *Green Building Certification Institute*) koja procenjuju ključne karakteristike zgrada vezanih za zdravlje ljudi i zaštitu životne sredine prema ovom standardu.

Pored savetodavnih funkcija i akreditacije objekata, GBCI takođe sprovodi obuku i akreditaciju profesionalaca. Postoje tri nivoa akreditacije, tj. tri stepena stručnosti na polju održive gradnje:

- osnovna obuka, koja donosi zvanje *Green Associate*;
- specijalizacija za određeni sistem ocenjivanja i zvanje *Acredited Professional*;
- najviši nivo stručnosti i zvanje *LEED Fellow*.

LEED standardom predviđeno je devet sistema ocenjivanja definisanih prema tipologiji objekata. Svi ovi sistemi imaju istu strukturu, ali se u okviru njih tretiraju različita specifična pitanja relevantna za dati tip objekata. Izuzetak su sistemi ocene porodičnih kuća i za prostorno planiranje, kod kojih postoje i dodatne kategorije.

Prilikom sertifikacije ocenjuje se devet ključnih kategorija:

- **Održivost gradilišta/parcele** (*Sustainable Sites – SS*) podrazumeva izbor parcele i odnos prema parceli tokom gradnje. Osnovni faktor pri ocenjivanju je da li je to zemljište *greenfield* („zeleno“, tj. neizgrađeno zemljište u ruralnom ili urbanom okruženju koje je dотле korišćeno za poljoprivredu, zelene površine ili je obraslo prirodnom vegetacijom) ili *brownfield* („smeđe“, tj. izgrađeno zemljište ili ono na kome su već postojali objekti). Sistem ocenjivanja je takav da ne ohrabruje „greenfield“ investicije, da zgrada treba da ima što manje uticaja na postojeće okolne ekosisteme i vodene tokove, da podstiče uređenje zelenih površina prema lokalnim uslovima, kontrolu atmosferskih voda, smanjenje erozije, zagađenje svetлом, kontrolu efekta topotnog ostrva (*heat island*) i zagađenja nastalog tokom izgradnje.
- **Potrošnja vode** (*Water Efficiency – WE*) zasniva se na činjenici da su zgrade glavni potrošači pitke vode. Cilj ove kategorije je da se podstiče svest o ekonomičnoj potrošnji vode u zgradama i oko njih korišćenjem uređaja s manjim utroškom vode, pažljivim izborom tipa zelenila i zelenih površina, kao i odgovarajućih sistema za navodnjavanje.
- **Energija i zagađenje vazduha** (*Energy & Atmosphere - EA*) je kategorija uvedena na osnovu podataka Ministarstva za energetiku SAD, po kojima zgrade u toj zemlji troše 39% energije i 74% ukupne proizvedene električne energije godišnje. Ova kategorija postiće širok spektar strategija za uštedu energije, kao što su odgovorno projektovanje, primena energetski efikasnih rešenja, upotreba „čistih“ energija i obnovljivih izvora energije, proizvodnja energije na samoj lokaciji i sl.

- **Materijali i sirovine** (*Materials & Resources – MR*) je kategorija koja se bavi činjenicom da tokom gradnje i veka trajanja zgrade ostaje mnogo otpada, i da se koriste velike količine materijala i sirovina. Stoga se ohrabruje izbor održivih materijala i održivi vidovi njihovog transporta, promoviše se smanjenje otpada, insistira se na ponovnoj upotrebu i reciklaži gde god je to moguće, a čak se uzima se u obzir i smanjenje otpada prilikom same njihove proizvodnje i prefabrikacije.
- **Kvalitet unutrašnjeg okruženja** (*Indoor Environmental Quality – IAQ*). Agenzija za zaštitu životne sredine SAD – EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) procenjuje da Amerikanci u proseku provode oko 90% svog vremena u zatvorenim prostorima, gde kvalitet vazduha može biti znatno lošiji od spoljašnjeg. Pored promocije poboljšanja kvaliteta unutrašnjeg vazduha, ova kategorija podstiče i obezbeđivanje prirodnog osvetljenja i poboljšanje akustičnih karakteristika zgrade.
- **Lokacija i povezanost** (*Locations & Linkages – LL*) zasniva se na činjenici da njihov veliki uticaj stambenih objekata na životnu sredinu potiče od same lokacije i njihove povezanosti sa zajednicom. Ovo je pogotovo izraženo u SAD, gde velika predgrađa svoju povezanost sa gradom (zdravstvenim ustanovama, prodavnicama, školama, radnim mestima, itd) direktno zasnivaju na individualnom automobilskom transportu). Poeni iz ove kategorije podstiču gradnju stambenih kuća daleko od osetljivih ekosistema, pre svega na lokacijama koje su već bile privedene nameni, tj. tamo gde su već postojali građevinski objekti. To znači da će najviše poena dobiti kuće koje su izgrađene u blizini već postojeće infrastrukture, kao i one koje pružaju mogućnost korišćenja pešačkog saobraćaja, fizičkih aktivnosti, i uopšte, vremena provedenog napolju.

- **Svest i obrazovanje** (*Awareness & Education - AE*) predstavlja sredstvo za unapređenje svesti stanovnika i korisnika objekata u pogledu održivosti i energetske efikasnosti. LEED sistem za rangiranje domova računa da je neko domaćinstvo zaista „zeleno“ onda kada se ljudi koji ga čine trude da postignu najveći mogući efekat dostupnih energetski efikasnih i ekološki naprednih rešenja. Krediti iz ove kategorije podstiču izvođače i prodavce nekretnina da obezbede neophodno obrazovanje, obuku i uputstva vlasnicima, stanarima i osoblju zaduženom za održavanje, kako bi mogli da razumeju šta jednu kuću čini zelenom i da u potpunosti iskoriste sve ono što je u nju ugrađeno, na način na koji je predviđeno.
- **Inovativnost u projektovanju** (*Innovation in Design - ID*) je kategorija koja daje dodatne kredite za projekte koji uključuju nove inovativne tehnologije i strategije u cilju poboljšanja karakteristika zgrade u tolikoj meri da se prevaziđe sve ono što se zahteva i boduje u drugim, osnovnim, kategorijama LEED sertifikacije ili u njima nije eksplicitno navedeno. Čak se boduje i učešće akreditovanih LEED profesionalaca u projektantskom timu kako bi se još u projektonoj fazi obezbedio sveobuhvatan i celishodan pristup.
- **Regionalni prioritet** (*Regional Priority – RP*) je kategorija koja promoviše posebne aspekte održivosti vezane za datu geografsku regiju i njena lokalna svojstva i potrebe.

Svaka od navedenih kategorija u sebi sadrži odgovarajuće elemente za bodovanje, a to su preduslovi i krediti. Preduslovi su obavezni uslovi, odnosno strategije koje se moraju uključiti da bi se dostigao osnovni stepen sertifikacije, dok su krediti opcione strategije za dostizanje određenog nivoa. Oni krediti koji se tiču direktnijeg uticaja na okruženje i dobrobit ljudi imaju veću težinu. Na osnovu sume stečenih kredita u svih šest kategorija, objektu se dodeljuje odgovarajući nivo sertifikacije koji svedoči o performansama zgrade u uslovima ekoodrživosti.

Prvi korak sertifikacije je registracija projekta, kojom se iskazuje namera da se projekat podvrgne procesu ocenjivanja. U fazi pripreme za podnošenje zahteva prikuplja se dokumentacija koja potvrđuje LEED preduslove i kredite, koje je odabrao podnositelj, a zatim se sve to dostavlja na *LEED Online portal*. Posle aplikacije, sledi preliminarno razmatranje u okviru kojeg se od kandidata mogu tražiti dodatne informacije i razjašnjenja. Poslednji korak je odluka o sertifikaciji na koju kandidat ima pravo žalbe.

Po LEED-standardu, svaka zgrada se ocenjuje u svih pet osnovnih kategorija i dve dodatne i da bi bila sertifikovana, mora dostići minimum 40 poena. Osnovni nivo sertifikacije je u rasponu od 40 do 49, srebrni sertifikat se dobija sa 50 do 59 poena, zlatni sa 60 do 79 poena, a platinasti nivo je od 80 poena pa naviše. Maksimalan broj poena je 100 + 10 [Pav 12a].

3.1.3 HQE šema sertifikacije

Certivéa je ogrankak naučno-tehničkog centra za građevinarstvo CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Batiment*) i jedna od vodećih internacionalnih organizacija za sertifikaciju komercijalnih zgrada prema HQE (*High Quality Environmental*) šemi sertifikacije. Ova organizacija je osnivač je Saveta za zelenu gradnju Francuske (FrGBC), a kao aktivan član internacionalne organizacije Saveza za održivu gradnju (SB Alliance) učestvuje u razvoju francuskog stručnog kadra iz ove oblasti na nacionalnom i međunarodnom nivou. Osnovna delatnost je sertifikacija, ali pored toga ova organizacija ima misiju da prepozna i podstakne najbolju praksu u zelenoj gradnji i eksploataciji objekata, kao i da usaglasi interes svih aktera (graditelja, menadžera, investitora...) u oblasti nekretnina.

Asocijacija *High Quality Environmental* je još 1996. godine kreirala istoimenu šemu sertifikacije za zelenu i održivu gradnju, prihvaćenu od strane Saveta za zelenu gradnju Francuske. HQE šemu sertifikacije posebnom čini pet osnovnih principa, a to su: sveobuhvatni pristup, adaptibilnost, najbolje performanse, tehnička ekspertiza i transparentnost poslovanja.

Sveobuhvatni pristup prilikom sertifikacije podrazumeva upravo uključivanje različitih kriterijuma koji u fokus postavljaju prirodnu sredinu i korisnika i ravноправno ih tretiraju. To omogućava konvergenciju interesa svih aktera (investitora, zakupca, vlasnika itd) i ciljeva vezanih za životnu sredinu prilikom kreiranja adekvatnih ambijenata. Kriterijumi su relevantni u ocenjivanju svake faze u životnom ciklusu jednog objekta, a primenjuju se od faze projektovanja, pa sve do upravljanja objektom i omogućuju prepoznavanje i primenu odgovarajućih mera za smanjenje negativnog uticaja na prirodnu sredinu.

Kriterijumi su dovoljno opšti da imaju mogućnost prilagođavanja različitim kulturnim i klimatskim podnebljima i nacionalnom zakonodavstvu različitih zemalja, bez rizika da se degradira konačni rezultat. U procesu sertifikacije nekog projekta postoje brojni preduslovi, kao što je poštovanje lokalnih propisa koji moraju biti ispunjeni. Da bi se postigao performativni minimum, projekat

mora da zadovolji najmanje sedam od četrnaest kriterijuma. Projekat čije su karakteristike ocenjene graničnim vrednostima označen je kao minimalni profil sistem.

Metodi procene performansi pripadaju novoj generaciji indikatora kompatibilnih sa internacionalnim standardima, kakve promovišu *Sustainable Building Alliance* (SBA) i Evropski komitet za standardizaciju CEN TC 350. Ova korespondencija garantuje kvalitet, a univerzalizacija kriterijuma prevazilazi prepreke na međunarodnom tržištu. HQE šema sertifikacije je čvrsto zasnovana na dostignućima nauke i tehnologije i sinergiji znanja stručnjaka iz oblasti građevine i tržišta nekretnina. Tehnička ekspertiza organizacije Certivéa razvija i posebne internacionalne sisteme za ekološke karakteristike uslužnih objekata i posebne referentne sisteme za njihovo upravljanje.

Transparentnost poslovanja sertifikacionog tela Certivéa garantuje revizor ili revizorska komisija, nezavisna od podnosioca zahteva za sertifikaciju i angažovana od strane organizacije Certivéa, i on nepristrasno procenjuje sve faze projekta za koji je podnet zahtev. Odluku o dodeli sertifikata donosi Certivéa uz saglasnost posebnog tela sastavljenog od građevinskih stručnjaka, investitora, zakupaca i drugih aktera.

HQE sertifikacijom su obuhvaćeni svi tipovi nerezidencijalnih objekata, od poslovnih, industrijskih, zdravstvenih, školskih, do prodajnih objekata i hotela. Četrnaest kriterijuma, na kojima se ova šema sertifikacije zasniva, obuhvata dve šire teme održivog razvoja; kontrolisanje uticaja građene sredine na prirodnu i stvaranje priјатног ambijenta zatvorenih prostora.

Prema ovoj šemi sertifikacije, gradnja će biti ocenjena kao ekološki podobna u zavisnosti od interakcije same zgrade sa neposrednim okruženjem, ali i uzimajući u obzir stepen uticaja gradilišta na okolinu u toku gradnje, kao i izbor ugrađenih materijala i sistema. To znači da se od prvih intervencija na parceli, pa sve do rušenja ili renoviranja objekta, mora sprečiti zagađenja vodenih resursa usled sedimentacije i erozije zemljišta, kao i narušavanje lokalnih ekosistema, usled loših karakteristika materijala i konstrukcija koje pospešuju pregrevanje i emisiju CO₂.

Podjednako važno je i upravljanje zgradom: rukovođenje energijom, vodom, održavanjem i kontrolom nad otpadom u toku korišćenja. Kad je reč o efikasnom korišćenju vode, ovi kriterijumi će biti ispunjeni primenom sistema za separaciju vode za piće od tehničke vode za irigacione sisteme i postrojenja, čime se smanjuje mogućnost zagađenja vodenih resursa. Održivo upravljanje je potpomognuto i sistemima koji generišu energiju iz obnovljivih izvora.

Zdravo i komforno okruženje korisnika zgrade je cilj koji se postiže analizom i ocenom faktora sanitарне ispravnosti vode, vazduha i tla, kao i procenom zvučnog, vizuelnog i olfaktornog (mirisnog) ugođaja. U tom smislu favorizovani su pasivni metodi zaštite od vetra i buke i omogućavanje prirodne ventilacije u okviru arhitektonskog rešenja.

Ovi kriterijumi ugrađeni su u HQE šemu sertifikacije i razvrstani u četiri kategorije: eko-gradnja (koja se odnosi na okruženje), eko-menadžment (odnosi se na energiju, vodu otpad i održavanje), komfor i zdravlje korisnika. U okviru kategorija odgovor na svaki kriterijum procenjuje se posebno, poredi sa uspešnim praksama i u skladu s tim u svakoj fazi projekta dobija ocenu *bon* – B ili *tres bon performance* – TP (dobre ili najbolje karakteristike). Kategorizacija služi jednostavnijem predstavljanju celokupnih karakteristika zgrade u Pasošu održive gradnje. Pasoš je opšti dokument primenljiv i na druge standarde, tako da omogućava komparaciju različitih sertifikata i sadrži zbirnu opisnu ocenu svake kategorije kriterijuma. Kategorije mogu dostići najviše četiri kredita, piktografski prikazana zvezdom, čijom sumom se dolazi do ukupne ocene održivosti zgrade. Ocene u pasošu su: *bon* (do 4 kredita); *tres bon* (5 do 8); *excellent* (9 do 11) i *exceptionnel* (za više od 12).

HQE sertifikat je odrednica koja ne samo da garantuje tzv. zelenu vrednost nekretnine, već donosi privilegiju za korišćenje specijalnih fondova. Ove beneficije, kao i činjenica da je proces sertifikacije efikasan i ubrzan, jer počinje još od najranije faze planiranja investicije, navele su brojne investitore, menadžere nekretninama, konsultantske i nadzorne organizacije na primenu HQE šeme sertifikacije. Prihvaćenost ove šeme sertifikacije dokazuje 500.000 sertifikovanih objekata ili onih u procesu sertifikacije, odnosno 11 miliona sertifikovanih kvadratnih metara [Pav 12b].

3.1.4 DGNB standard

Savet održive gradnje Nemačke DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*) oformljen je 2007. godine kao neprofitna nevladina organizacija, a danas okuplja preko hiljadu članova iz sektora građevinarstva i nekretnina, industrije i proizvodnje, menadžmenta i javnih preduzeća, nevladinih organizacija, nauke i institucija za testiranje. Cilj Saveta je razmena iskustava, ekspertiza i edukacija, podizanje svesti javnosti o potrebama održivog razvoja i zelene gradnje. U nastojanju da promoviše održivu izgradnju, Savet je odlučio da razvije sistem sertifikacije posebno ekološki i ekonomski efikasnih zgrada, koje štede resurse i prilagođene su potpunoj udobnosti korisnika i to je DGNB sertifikat.

Savet predstavlja regulatorno telo koje vrši procenu dokumentacije i dodeljuje sertifikate objektima koji zadovoljavaju nivoje usklađenosti sa standardom na osnovu seta kriterijuma i sistema bodovanja. Takođe, Savet je u saradnji sa mnogobrojnim stručnjacima razvio dodatne alate za pomoć prilikom procesa procene objekata i bazu podataka građevinskih proizvoda koji zadovoljavaju kriterijume standarda. Organizuje Akademiju za obrazovanje i sprovodi obuku i dodeljivanje licenci za lica koja učestvuju u procesu sertifikacije objekata. Svake godine Savet održava konferencije, sajmove i pilot projekte putem kojih promoviše i unapređuje riznicu znanja o zelenoj gradnji.

Savet je početkom 2008. godine predstavio svoj standard za sertifikaciju zelenih objekata. Standard podjednako tretira svaku fazu životnog ciklusa građevine, od projekta do gotovog objekta, prema identičnim kriterijumima, a u skladu sa različitim profilima korisnika tih građevina. Standard reaguje na buduće tehnološke i sociološke promene i adaptira se klimatskim, građevinskim, zakonodavnim i kulturološkim karakteristikama drugih zemalja. Takođe, veoma je fleksibilan i omogućava sertifikaciju objekata koji su lokalno i međunarodno komparabilni, usklađujući internacionalne verzije standarda sa propisima EU i ESUCO (Evropska baza za održive građevine).

Kompanije, grupacije ili investitori pojedinci dobijanjem sertifikata za svoje vlasništvo drugačije pozicioniraju svoj nastup na tržištu. Velikom broju

opština i zajednica potrebni su pouzdani temelji za implementaciju ciljeva održivog razvoja, što DGNB standard omogućava preko novih profila korisnika za gradske distrikte. Kada se sertifikat za distrikt prvi put primenio, internacionalni sertifikati za projekte urbanog razvoja dodeljeni su u Nemačkoj, Luksemburgu i Švajcarskoj.

Posebna karakteristika protokola je sveobuhvatan pristup, ali i fokus na ekonomiju. Bilo da se radi o novoj građevini, postojećem objektu ili projektu medernizacije i rekonstrukcije i bilo da su u pitanju pojedinačni objekti ili celokupni okruzi, sistem sertifikovanja pokriva sve glavne aspekte održivih objekata i obuhvata sledeće kategorije:

- životna sredina,
- ekonomija,
- socio-kulturni i funkcionalni aspekt,
- tehnologija,
- proizvodni proces,
- lokacija gradilišta objekta.

Procene prve četiri oblasti imaju podjednaku težinu u okviru DGNB standarda. Principi održivosti nekog objekta jednako su vredni kao ekomska isplativost tog poduhvata, tj. procena torškova celokupnog životnog ciklusa objekta.

DGNB okuplja, obučava i informiše učesnike u zelenoj gradnji. Postoje DGNB Akademija, DGNB navigator kao pionirska platforma internet baze znanja o građevinskim proizvodima i godišnje konferencije i sajmovi koje organizuje Savet. Akademija je formirana radi obrazovanja svih učesnika u procesu gradnje, počevši od vlasnika objekata do arhitekata, inženjera, izvođača radova, trgovaca i brokera, kao i studenata. Akademija je podeljena u tri segmenta: za bazično upoznavanje sa zelenom gradnjom; zatim o DGNB standardu za sertifikaciju u vidu obaveznih kurseva o sistemu i naprednih kurseva za nove profile korisnika; znanje o specifičnim oblastima kroz programe seminara i obuke na licu mesta. Modularni sistem obučavanja polaznika obuhvata tri stepena: za DGNB Consultant, Auditor ili Registered Professional.

Prvi stepen je DGNB konsultant, sastavljen iz tri modula, gde se stiče osnovno znanje i upoznavanje sa kriterijumima standarda. Drugi stepen obučavanja se nadovezuje na stečeno znanje prvog stepena i uz dodatni modul sa praktičnim znanjem i radionicama dobija se pozicija DGNB revizora. Revizori mogu biti stručnjaci i inženjeri tehničkih ili prirodnih nauka ili ekonomisti sa višegodišnjim radom u struci nakon studija i rada na zelenim projektima. Revizor je ključna osoba u procesu sertifikacije. On predstavlja vezu između Saveta i projektantskog tima i može da savetuje tim tokom celokupne faze projektovanja i građenja. Treći, najviši stepen je registrovani profesionalac.

DGNB standard je namenjen proceni različitih vrsta objekata podjeljenih prema profilu korisnika. Šeme koje su dostupne u okviru sertifikacije po DGNB standardu za postojeće objekte su poslovne i administrativne zgrade. Za modernizaciju su poslovne, administrativne zgrade i šoping centri, kao i objekti maloprodaje. Za nove građevine su obrazovne ustanove, kancelarijski i poslovni objekti, mešoviti gradski distrikti, centri i objekti maloprodaje, supermarketi, hoteli, industrijski objekti, bolnice, objekti laboratorija, javne zgrade skupštine, stambeni objekti.

Prema DGNB standardu postoji nekoliko nivoa pristupanja procesu sertifikacije objekata. Faza razvoja projekta omogućava preliminarnu dokumentaciju i preliminarni sertifikat za nove objekte. U fazi planiranja i građenja može se dodeliti sertifikat za nove objekte. Faza upotrebe objekta, odnosno sertifikat za postojeće objekte i faza modernizacije, tj. rekonstrukcije zahteva sertifikat za modernizaciju.

U svim fazama podjednako su tretirane četiri kategorije sa učešćem od 22,5%: ekološki kvaliteti, ekonomski kvaliteti, socio-kulturni i funkcionalni kvaliteti i tehnički aspekti. Druge dve kategorije su kvalitet prosesa, koji se razmatra sa 10% učešća i održivo gradilište kao zasebna kategorija. Katalog od skoro šezdeset kriterijuma služi kao baza za sertifikat. Kriterijumi su ocenjivani na osnovu njihove važnosti za određeni profil korisnika i koriste se za formiranje matrice bodovanja. Procene ukupnih performansi objekta ne predstavljaju individualne mere, već smernice. Podstiču se inovativni koncepti projektovanja i

građenja, što ostavlja prostora za prilagođavanje u ranim fazama građenja, eksploatacije, konverzije i uklanjanje objekta uz optimalne troškove.

Posebni zahtevi u okviru kontrole kvaliteta po DGNB standardu obuhvataju sledeće kategorije:

- **Ekološki kvalitet** tiče se potencijala globalnog zagrevanja, uništavanja ozonskog omotača, potencijala fotohemijiskog stvaranja ozona, acidifikacije, odnosno potencijalnog rizika nezgoda sa kiselinama, eutrofikacije, tj. organskog zagađenja, rizika po lokalnu životnu sredinu, održive upotrebe resursa, mikroklima, zahteva za neobnovljivim izvorima energije, ukupne primarne potrebe za energijom i proporcija obnovljivih izvora energije, oblika upotrebe neobnovljivih resursa, kategorije otpada, potrebe za pijaćom vodom i volumena otpadnih voda, potrebe za prostorom.
- **Ekonomski kvaliteti** su troškovi povezani sa životnim ciklusom objekta i održivost prema trećem licu.
- **Socio-kulturni i funkcionalni kvaliteti** obrađuju teme vezane za termički komfor u letnjem i zimskom periodu, higijenu unutrašnjeg prostora, akustički komfor, vizuelni komfor, mogućnost kontrole uslova za svakog korisnika, kvalitet spoljašnjih prostora, sigurnost i rizike od opasnih incidenata, pristupačnost za osobe sa invaliditetom, efikasnost prostora, mogućnost konverzije funkcija objekta, vrste javnog pristupa/prilaza objektu, mogućnost biciklističkog saobraćaja, osiguranje projektovanja i urbanog razvoja u odnosu na konkurenčiju, kvalitet pozitivnih doprinosa za različite profile korisnika, socijalnu integraciju.
- **Tehnički kvaliteti** se odnose na prevenciju požara, zvučnu izolaciju, kvalitet spoljašnjeg omotača objekta u odnosu na toplotu i vlažnost, efikasna rešenja za podršku operativnim procesima

objekta, kvalitet opremljenosti objekta, trajnost, lakoća čišćenja i održavanja, otpornost na oluje, grad i poplave, lakoću rasklapanja i reciklaže.

- **Kvalitet procesa** podrazumeva kvalitet pripreme projekta, integrисано planiranje i projektovanje, metode optimizacije i kompleksnost planiranja, dokaz održivih aspekata tendera, stvaranje uslova za optimalnu upotrebu i menadžment, gradilište i građevinski procesi, kvalitet izvođača radova i prekvalifikacija, nivo sigurnosti izvođača, puštanje u rad, menadžment, sistematična inspekcija, održavanje i servisiranje, kvalifikacije za tehničko osoblje.
- **Kriterijum gradilišta i lokacije** su rizici po mikrookruženje, uslovi u mikro-okruženju, javna slika i stanje uslova na gradilištu i u susedstvu, transportni pristup, blizina upotrebe specifičnih postrojenja, konekcije sa javnim servisima, pre svega komunalnim uslugama, legalna situacija za planiranje, opcije proširenja ili rezerve.

Kako bi DGNB sertifikat učinili informativnim i preciznim, jasno su definisane vrednosti ciljeva za svaki od kriterijuma. Svaki kriterijum može da donese najviše 10 poena na osnovu dokumentovanih i izračunatih kvaliteta. Poeni dodeljeni od strane revizora, planera ili arhitekte za svaki individualni kriterijum i važnost tog kriterijuma kolektivno proizvode ukupan rezultat i svih šest kategorija ponaosob. Rezultat pokazuje opseg u kojem su ispoštovani zahtevi. Ukoliko je rezultat 50% dodeljuje se bronzani sertifikat, ukoliko je to više od 65% dobija se srebrni setifikat i ako objekat zadovoljava više od 80% može da osvoji zlatni sertifikat. Objekti koji ne ispune minimane zahteve i ukupan rezultat bude manji od 35% ne mogu se kvalifikovati za dobijanje sertifikata.

Jedna od najvažnijih odluka za proces sertifikacije je vreme kada se pristupa tom procesu u odnosu na stadijum koji u datom trenutku ima objekat/projekat. Kada je projekat nove građevine u ranoj fazi razvoja i kada se razrađuju bazični – početni koraci ka formiranju programa, funkcija i konstrukcija objekta, lako se uvode preporuke standarda. Slično je i kada su u pitanju preliminarni crteži projekta. Međutim, nakon što se odobre glavni projekti i pristupi se procesu pripreme dokumentacije za građevinsku dozvolu, stvari naglo počinju da se menjaju. Ukoliko se preporuke uvrste u projekat nakon dobijanja odobrenja za finalne crteže i počne se sa formiranjem gradilišta, izmene koje se mogu primeniti daleko su manje nego što bi to bilo da su projektanti imali na umu i raspolažanju sva tehnička rešenja u fazi projektovanja. Takođe, kako se projekat bliži završnoj fazi tendera i početku gradnje, mogućnosti promene i usaglašavanja sa standardom se smanjuju, a troškovi za primenu određenih izmena se povećavaju, dok na kraju, po završetku objekta, praktično probijaju budžet i napor da se tada objekat preobradi u ekološki i energetski efikasniju građevinu su preveliki, a mogućnosti minimalne.

DGNB ima nekoliko novina u odnosu na druge poznate standarde. To je pre svega set kriterijuma, zatim veća briga o korisniku prostora (specifičan korisnički dizajn, kao što je pristupačnost hendikepiranim osobama i efikasno korišćenje prostora), programi i internet portali za sertifikaciju. Kreiran je jedinstveni program - DGNB sofver, koji predstavlja lak način za planiranje održivosti. Možda najzanimljiviji segment predstavlja tzv. DGNB navigator. Reč je o pionirskoj platformi za građevinske proizvode, bazi podataka sa informacijama o proizvodima koji odgovaraju kriterijumima standarda i namenjeni su za izgradnju, opremanje, održavanje ili neki drugi karakteristični proces u okviru objekta. Takođe, navigator može obavestiti proizvođače koje preduslove svaki proizvod mora da zadovolji i kako da dokumentuju sve te informacije da bi se kvalifikovali za sektor zelene gradnje. Navigator predstavlja svojevrsnu vezu između različitih strana uključenih u planiranje, izvođenje objekata i proizvođača materijala i poizvoda [Uze 12b].

3.2 Upravljanje kvalitetom

Osnovna ideja totalnog upravljanja kvalitetom je ideja modernog sistema za obezbeđenje kvaliteta, čime se nastoji da se umesto starog postupka kontrole delova proizvoda, procesa i podprocesa, uspostavi povezani skup metoda i postupaka, odnosno uspostavljanje organizovanog sistema u kome će svaki pojedinac da bude odgovoran za kvalitet i valjanog posla koji obavlja a na osnovu odgovarajućih upustava i procedura. Na dostizanje kvaliteta treba da radi čitavo preduzeće. Ipak, organizaciona jedinica koja je zadužena za obezbeđenje kvaliteta, snosi najveću odgovornost s na to obzirom da ima tačno utvrđen zadatak u delu kvaliteta.

Upravljanje kvalitetom projekta ima za cilj da obezbedi kvalitet procesa realizacije u svim njegovim segnemtima do samog završetka. Pri tome je važno da projektni zadatak ne odstupi od propisanih standarda kvaliteta. Upravljanje kvalitetom projekta u načelu predstavlja jednu od faza odnosno podprocesa upravljanja projektom. Integrисани sistem menadžmenta predstavlja realnost sa kojom je suočeno najviše rukovodstvo svake organizacije ili svaki „vlasnik“ procesa. Može se tvrditi da svaka organizacija ima neki oblik integrisanog sistema menadžmenta jer uprava i izvršno rukovodstvo (top menadžment) ima obavezu da primenjuje zakonske i druge nacionalne propise koji se odnose na zadovoljavanje zahteva zainteresovanih strana: društva, vlasnika, zaposlenih, kupaca, isporučilaca i drugih. Posedovanje sertifikata za sistem menadžmenta kvalitetom, ISO 9001, svedoči samo da organizacija uspešno upravlja procesima od značaja za kvalitet proizvoda, međutim, sertifikat QMS ne mora da znači i zadovoljavanje zahteva ostalih zainteresovanih strana. Rukovođenje ili menadžment u svim poslovima i organizacionim aktivnostima je ponašanje ljudi u cilju postizanja određenog cilja efektnim korišćenjem dostupnih resursa. To obuhvata planiranje, organizovanje, vodenje, kontrolisanje organizacije da se postigne odredjeni cilj. Postojeća iskustva uspešnih organizacija, a posebno procesni pristup u novoj seriji standarda ISO 9001, obezbeđuju da se na osnovu dokumenata ISO 9001, uspešno razvije i uvede u praksu IMS2, kao snažan alat menadžmenta za razvoj poslovne izvrsnosti. Dokumentovan IMS u

organizaciji pruža najvišem rukovodstvu mogućnost za uspešnu realizaciju utvrđene misije i vizije, odnosno za uspešno upravljanje ciljevima organizacije na bazi činjenica, u skladu sa zahtevima svih zainteresovanih strana. Na osnovu ovakvog pristupa može se definisati integrисани sistem menadžmenta (IMS) kao: sveobuhvatni alat menadžmenta koji povezuje sve elemente poslovnog sistema u jedinstven i celovit sistem upravljanja procesima u organizaciji, radi zadovoljavanja zahteva zainteresovanih strana i ostvarivanja poslovnih ciljeva u skladu sa vizijom i misijom organizacije. Da bi jedna organizacija efektivno i efikasno funkcionala, ona mora da identificuje, a zatim i da upravlja brojnim povezanim aktivnostima radi ostvarenja svog „globalnog zadatka“ – koji predstavlja misiju organizacije. Svaka aktivnost koja koristi resurse i kojom se upravlja da bi se transformisali ulazni elementi u izlazne, smarta se procesom. Korišćenje sistema procesa u organizaciji, uključujući njihovu identifikaciju, međusobno delovanje i upravljanje tim procesima, kvalifikuje se kao „procesni pristup“. Jedna od prednosti procesnog pristupa je mogućnost neprekidnog upravljanja, koje se izvodi preko definisanih veza između pojedinih procesa (podprocesa, aktivnosti i zadataka) u sistemu procesa posredstvom informacione infrastrukture, kao i preko kombinacije njihovog međusobnog delovanja. Procesni pristup QMS obezbeđuje da se iskoristi dokumentacija ISO 9001 za realizaciju i formalizovanje IMS, ali i da se ta dokumentacija u potreboj meri proširi, tako da se u osnovnim procesima, pored aktivnosti koje se odnose na sistem menadžmenta kvalitetom, identifikuju aspekti i aktivnosti od značaja za sve sisteme menadžmenta (životnom i radnom sredinom, finansijama, rizicima). U tako proširenoj dokumentaciji za upravljanje procesima (podprocesima i aktivnostima) treba definisati ovlašćenja i odgovornosti u vezi zahteva svih zainteresovanih strana, a takođe utvrditi zapise i način informisanja rukovodstva radi donošenja poslovnih odluka na bazi činjenica. To je uslov za uspešno neprekidno unapređenje poslovnih performansi organizacije.

Ključna uloga najvišeg rukovodstva je, svakako, definisanje optimalne organizacione strukture i obezbeđenje neophodnih resursa (informacija, znanje, tehnologije i opreme, infrastrukture, finansijskih sredstava, komunikacija) u

određenim sektorima (funkcijama) organizacije, kako bi se postigli očekivani poslovni rezultati. Organizaciona struktura, prema ISO 9001, predstavlja uređena pravila odgovornosti, ovlašćenja i odnosa između zaposlenih.

Procesni pristup može doprineti da se unapredi organizacija rada, napuštanjem uobičajene prakse koja polazi od „unapred“ usvojenog „pravilnika o sistematizaciji poslova i zadatka“, već da se polazeći od misije, vizije i postavljenih dugoročnih i kratkoročnih ciljeva organizacije (od strane rukovodstva), izvrši integracija svih aspekata, zahteva i aktivnosti u okviru procesa, kako bi se realizovao integrисани sistem menadžmenta preko mreže procesa. U ovom slučaju svako od zaposlenih nije svoj deo posla usko vezao po rešenju kako je primljen već po potrebi posla uskače i radi operacije za koje je osposobljen. Davanje prednosti, odnosno ključne uloge, upravljanju procesima naspram upravljanju organizacionim celinama je važan princip i radikalna promena koju ISO 9001 unosi u pristupe kvalitetu. Polazeći od ove činjenice, biće lakše izvodljivo, primereno stvarnim aktivnostima u procesima i kompleksnim vezama tih aktivnosti sa zahtevima različitih MS (standarda, zakona, propisa), da se tek posle opisivanja procesa, pristupi definisanju neophodnih organizacionih celina i njihovih performansi (potrebna znanja i kvalifikacije, broj zaposlenih, oprema, itd.), koje treba da obezbede zahtevane resurse za realizaciju projektovanih procesa u okviru klasične matrične organizacije. Na ovaj način, stvarne aktivnosti u skladu sa postavljenim zahtevima zainteresovanih strana u procesima, definisaće i potrebne tehnološke karakteristike organizacionih celina, koje svojim specijalizovanim znanjima i veštinama treba da učestvuju u realizaciji opisanih aktivnosti u okviru procesa IMS. Planiranje potrebnih resursa rukovodstvo izvodi na osnovu analiza zahteva iz procesa koji se realizuju na propisani način, uz ispunjavanje zahteva svih zainteresovanih strana. Sektori imaju zadatak da neprekidno razvijaju i unapređuju znanje i tehnologije, koje zatim primenjuju u realizaciji brojnih aktivnosti u svim procesima i podprocesima. Obim aktivnosti u procesima, s obzirom na utvrđene poslovne ciljeve i planove (godišnje, kvartalne, mesečne), predstavlja osnovu za planiranje i razvoj neophodnih resursa u organizaciji, uključujući i ljudske resurse.

3.3 Projektovanje zelenih zgrada

Objavljivanje podzakonskih akata vezanih za termičke karakteristike zgrada i izdavanje sertifikata o njihovoj energetskoj efikasnosti, popularno nazvanih zelenim pasošima, izazvalo je burne polemike. Donošenjem ovih pravilnika, otvarila su se i neka druga pitanja vezana za prirodu odnosa arhitektonskog pristupa i pristupa drugih struka koje učestvuju u procesu nastajanja jedne zgrade, kao i u procesu izrade tehničke dokumentacije. Ova dva pristupa međusobno su povezana, budući da je njihov rezultat jedinstven, a to je zgrada. U cilju poboljšanja kvaliteta zgrada, a time i poboljšanja njihove energetske efikasnosti, neophodno je da se u proces projektovanja vrati lična komunikacija svih projektanata koji učestvuju u procesu. Termin koji je danas usvojen da definiše ovaku komunikaciju i projektantski pristup je integralno ili integrисано projektovanje. Ovakvo projektovanje podrazumeva da se svi projektanti okupe i kroz zajedničku diskusiju i usaglašavanje izvedu jedno jedinstveno rešenje. To podrazumeva toleranciju, ne dominaciju, i pre svega otvoren pristup dogovaranju.

Projektovanje po standardima savremenog građevinarstva, a naročito za zahtevne od posebnog značaja, danas se izvodi primenom BIM tehnologije (*Building Information Modeling*), koja objedinjuje geometriju, prostorne odnose, analizu osvetljenja, geografske parametre, količine materijala i tehnički opis elemenata. BIM može predstaviti kompletan životni vek objekta, od procesa gradnje do scenarija korišćenja, tj. odžavanja objekta, i pruža jednostavno dobijanje svih potrebnih informacija o utrošku materijala (npr. prilikom izrade specifikacija i proračuna troškova). Obim i određena polja rada mogu biti izdvojena iz projekta i posebno definisana, a sistemi, montaža ili delovi objekta mogu biti prikazani u odgovarajućoj razmeri u odnosu na ceo objekat ili grupu objekata. Najveća prednost BIM-a jeste pouzdaniji prenos informacija između različitih projektnih timova, ali i projektanata i izvodjača, odnosno po završetku projekta, pristup pouzdanim informacijama za one koji održavaju objekat (KGH sistemi, vodovod i kanalizacija, itd.)

3.4 Prioriteti u projektovanju zelenih zgrada

3.4.1 Ispitivanje prepostavki

U ovom segmentu preispituju se sledeće stavke: da li je nova zgrada potrebna; da li je opravdano da projekat bude na neizgrađenom zemljištu; da li površina objekta mora da bude zaista toliko velika ili nam može odgovarati manji prostor; da li je samo početna cena ona koju smo uzeli u obzir tokom projektovanja i gradnje; da li zaista mora da košta više ako je zelena zgrada? Uštede se mogu napraviti smanjenjem gabarita, sabijanjem zgrada kompleksa, kreativnim upravljanjem, atmosferskim vodama i mnogim drugim načinima.

3.4.2 Korišćenje integrisanog procesa projektovanja

Integrисано пројектовање је срце зелене зграде, и онога не само да води до боље зграде већ и смањује трошкове извођења. За највећи број пројектаната, он треба да буде обавезан део процеса nastanka једне зграде. Највећа помоћ у процесу пројектовања пружа BIM.

3.4.3 Prelaženje границе задатог

Стручњаци се slažu да су потребне корените промене у начину на који се пројектују и изводе зграде. Današnji stav nije да се само смањи енергија на годишnjem nivou, већ се мора и агресивно наступити у вези са водом, опасним хемикалијама, употребом землjišta itd. Иновација у пројектовању је категорија која подразумева коришћење иновативних грађевинских технологија из најбољих примера у практици. У то се убрајају, на пример, технолошке идеје за redukciju потрошње воде више од стандардизованог захтева од 40%, количине грађевинског отпада више од 75% или технологије које омогућавају више од 75% дневног осветљења. Циљ посебног вредновања нових идеја је да садашње иновације у будућности постану стандард.

3.4.4 Uključivanje strategije zelene gradnje u svakodnevnu praksu

Dok vrhunski primeri zelene gradnje prelaze nove granice, mnoge osnovne zelene strategije mogu da postanu svakodnevna praksa. Energetsko modelovanje, na primer, treba da bude standardni deo procesa projektovanja danas, ali i ciljevi energetske efikasnosti. Štedljive vodovodne instalacije treba da budu standardni način opremanja objekata, obavezno naveden u specifikacijama. Konsultanti treba da uvedu promene u svoj rečnik tako da se obavežu da će učestvovati u stvaranju visokoefikasnih rešenja.

3.5.5 Težnja za zelenim sertifikatima za svoju zgradu

Sertifikacija bi trebalo da bude jedan od glavnih prioriteta za projektante, naročito za one sa malo iskustva u stvaranju niskoenergetskih zelenih zgrada. Zato u toku projektovanja treba angažovati profesionalce koji znaju šta je potrebno i kako doći do sertifikata. Na ovaj način se štedi za naknade sertifikacionim telima koja će isporučiti listu mera za poboljšanje projekta. Tako se ne rizikuje da izgrađen objekat bude odbijen.

3.4.6 Primena kvalitetnih i sertifikovanih proizvoda

Svaki dobar proizvođač, automatski i ima neki sertifikat koji se odnosi na zelene karakteristike proizvoda. Jedan od sertifikata, koji važi za drvo i proizvode od drveta, je FSC. Arhitekte treba da poznaju različite sertifikate, a ako neko nema sertifikat, arhitekte daju ocenu prema transparentnosti (proizvođač treba da objasni šta sadrži taj proizvod, odakle potiču sirovine i sl.).

3.4.7 Smanjenje potrebe za grejanjem i hlađenjem

Treba imati u vidu da su zastakljene površine kompleksnije ili skuplje u odnosu na površinu zida, temelja, krova, i da ih treba svesti na optimalnu meru. Tome pomaže 3D modelovanje zgrada ali i arhitektonsko rešenje. Mere koje se

sprovode su: upotreba debljih slojeva izolacije i zaptivanje konstrukcije uz efikasnu ventilaciju, ugradnja visokoefikasnih prozora, pasivan dizajn (da bi se sprečilo preterano zagrevanje) odnosno optimalno korišćenje toplotne energije sunčeve svetlosti, iskorišćenje obnovljivih izvora energije, solarne i geotermalne energije, biomase i potencijala veta. Ušteda energije počinje smanjenjem potražnje za energijom i to pasivnim bioklimatskim strategijama – postavljanjem susednih zgrada tako da izoluju jedna drugu i optimalnom orijentacijom u projektovanju naselja; ili dizajnom omotača niske toplotne transmisije i racionalizacijom gabarita zgrade. Koristeći energiju na štedljiv način, moguće je znatno smanjiti troškove, istovremeno redukujući emisiju CO₂ u atmosferu.

3.4.8 Smanjenje potrebe za transportom

Čest je slučaj da je potrebno potrošiti jednaku količinu energije da lice dođe i ode iz zgrade nego što je potrebno energije za njegov rad. To znači da je važno izabrati lokaciju koja ima mogućnost alternativnog pristupa (staze, trotoari i veza sa javnim transportom). Takođe, ugradnja lokalnih materijala (koji potiču sa područja u radijusu od 800 km) nagrađuju se u sistemu ocenjivanja zelenih zgrada zbog smanjenja potrebe transporta. Regionalni prioriteti su ustanovljeni u relaciji sa lokalnim ekološkim problemima i mogućnostima iskorišćenja resursa.

3.4.9 Smanjenje potrošnje vode

Efikasnost u potrošnji vode postiže se strategijama za smanjenje potrošnje vode za piće. Primera radi, podstiče se primena sistema za rekuperaciju kišnice, koja se potom koristi kao tehnička voda, ili ugrađivanje slavina sa regulatorima protoka, koje garantuju efikasnost u potrošnji vode. Pored ovoga, koriste se i štedljive vodovodne instalacije, kao i odgovarajući tretman otpadnih voda čime se omogućava njihova ponovna primena.

3.4.10 Obezbeđenje zdravog ambijenta

Zelena zgrada treba da bude zdrava zgrada, bez buđi, isparenja i hemikalija, kao i da se ne stvara visok stepen ugljen-dioksida. Kvalitet uslova boravka podrazumeva da je ambijent unutar zgrada projektovan tako da bude adekvatno osunčan i favorizuje termički, akustički komfor za krajnjeg korisnika. Strategije za postizanje kvaliteta vazduha u prostorijama su sistemi ventilacije povezani sa senzorima za CO₂ i efikasnim vazdušnim filterima. Za dobrobit budućeg korisnika važno je i sprečavanje prodora vlage još u toku gradnje, termički i akustički komfor i osunčanje. U praksi se pokazalo da poboljšano zdravlje i produktivnost, na duži rok, može ostvariti veliki povratak investicija. Kvalitetni i zdravi uslovi stanovanja povećavaju prodajnu vrednost i smanjuju rizik od odgovornosti vlasnika zgrade.

3.4.11 Optimizacija upotrebe materijala

Ovde je potrebno raditi po standardnim dimenzijama tj. smanjiti gabarite objekta, koristiti najefikasnije materijale, smanjiti građevinski otpad – reciklaža. Materijali i resursi iskorišćeni prilikom gradnje treba da budu prirodni i obnovljivi u krajnjem roku od deset godina. Svi sistemi standardizacije zelenih zgrada promovišu reciklažu, bilo da je reč o primeni recikliranih materijala ili o mogućnosti ponovne upotrebe proizvoda, jer se tako smanjuje zagađenje sredine građevinskim otpadom.

3.4.12 Zaštita i obnova okoline gradilišta

Postoje brojni indirektni načini da zelene zgrade i izbor materijala pomognu da se očuva biodiverzitet planete (manja potrošnja fosilnih goriva, upotreba sertifikovanog drveta i lako obnovljivih materijala kao što su bambus, slama...). Održivo gradilište i lokacija su temelj održivosti zgrade ili urbanog područja. Održivim se smatraju tzv. „brownfield“ lokacije, odnosno degradirana područja podvrgнутa urbanoj obnovi, kao i lako dostupne lokacije, usled čega

su smanjene potrebe transporta, a time i intenzitet zagađenja ugljen-dioksidom. Zgrade moraju imati minimalni uticaj na oblast oko gradilišta, odnosno oko objekta u eksploataciji.

3.5 Optimizacija u funkciji održivog razvoja

Iako se najčešće povezuje sa zaštitom životne sredine i planiranjem društvenih tendencija, pojam održivog razvoja zapravo predstavlja novu paradigmu u smislu strategije i filozofije društvenog razvoja. Slično je i sa ekologijom, koja se obično poistovjećuje sa zaštitom životne sredine, mada je to nauka koja se bavi proučavanjem međusobnih odnosa između živih organizama i njihovog okruženja, dok je zaštita životne sredine samo njen mali segment [Vas 06].

Aktuelnosti pojma održivog razvoja naročito doprinose izazovi koji prate sve veću ugroženost životne sredine, budući da nagli porast privrede može dovesti do iscrpljivanja prirodnih resursa i zagađenja životne sredine. Shodno tome, jedan od osnovnih koncepata upravljanja prirodnim resursima i životnom sredinom jeste upravo koncept održivosti, odnosno održivog razvoja, koji u današnje vreme zauzima centralno mesto u razmatranju dugoročne perspektive opstanka i napretka čovečanstva, ne samo u smislu suštinskog predušlova i težnje, nego i kao konačan cilj efikasne organizacije ljudskih aktivnosti na planeti [Štr 12].

U savremenoj literaturi može se naći mnoštvo različitih shvatanja i poimanja termina održivosti i održivog razvoja, ali se sve definicije mogu načelno svrstati u pet grupa, koje održivost definišu kao:

- stanje u kome korisnost i nivo potrošnje ne opadaju tokom vremena;
- stanje u kome se resursi koriste tako da buduće proizvodne mogućnosti čovečanstva ostanu očuvane;
- stanje u kome zalihe prirodnog kapitala ne opadaju s vremenom;
- stanje u kome se resursi eksploratišu tako da donose održivi prinos ili prirast;
- stanje u kome je trajno zadovoljen minimum uslova stabilnosti i ravnoteže ekosistema [Buz 13].

Nepoštovanje osnovnih koncepata održivog razvoja posledično vodi ka neefikasnom privrednom razvoju budući da dolazi do nepotrebnog rasipanju raspoloživih resursa i energije [Peš 02], što znači da se ciljem održivog razvoja može smatrati uspostavljanje ravnoteže tri ključna faktora održivosti, a to su održivi ekonomsko-tehnološki razvoj, održivi razvoj društva na temeljima socijalne ravnoteže i održivost na ekološkom planu kroz odgovoran odnos prema životnoj sredini, pre svega kroz racionalno raspolađanje prirodnim resursima [UN 87, Đuk 99].

Održivost u tehnokratiskom smislu porazumeva kontinualan privredni rast bez inflacije i izrazite spoljne zaduženosti. Iako privredni rast neretko ima veoma negativan uticaj na životnu sredinu, ekonomski prosperitet predstavlja veoma važan element održivog razvoja jer su zadovoljenje materijalnih potreba i materijalno blagostanje važan preduslov za napuštanje lokalno orientisanog antropocentričkog načina razmišljanja (ja i moje potrebe) i prelazak na globalno orijentisan način razmišljanja (dobrobit zajednice, čovečanstva, planete) [Vol 05].

Održivost na socijalnom planu odnosi se na eliminaciju siromaštva i različitih vidova socijalne patologije, čime se fokus sa trenutnih potreba dislocira i prebacuje na potrebe čovečanstva i budućih generacija, dok održivost u ekološkom smislu podrazumeva očuvanje prirodnih resursa i životne sredine putem ostvarivanja dugoročnih ciljeva kao što su ograničenje globalnog zagrevanja, smanjenje destrukcije biodiverziteta, kontrola i ograničenje emisije toksičnih materija i sl [Mil 12b].

U kontekstu održivog razvoja, osnovni cilj optimalnog projektovanja je da se smanji uticaj zgrade na okolinu uz prihvatljive troškove ne samo izgradnje i opreme objekta, nego i eksploatacije tokom njegovog čitavog životnog ciklusa. Ova dva cilja su često u koliziji zato što elementi i oprema koji povećavaju energetsku efikasnost mogu značajno da povećaju cenu izgradnje.

Ukoliko se kao primarni cilj postavi energetska efikasnost, rešenje koje se računski dobije kao optimalno verovatno će biti veoma nepovoljno u finansijskom smislu, dok, s druge strane, ekonomski najpovoljnije (najjeftinije) rešenje verovatno neće zadovoljiti sve uslove propisane zahtevima energetske efikasnosti.

Treba imati u vidu da, matematički gledano, ovaj problem ima veoma veliki broj promenljivih, među kojima su: izbor materijala za pojedine delove konstrukcije, izbor tipa konstrukcije i njenih geometrijskih karakteristika, orientacija zgrade u prostoru, vrsta krovne konstrukcije, veličina streha, vrsta i veličina prozora na pojedinim zidovima (procenat zastakljenosti), izbor HVAC sistema (grejanje, hlađenje i ventilacija) i mnoge druge. Ako se pri tome uzme u obzir da na tržištu za svaku od navedenih stavki postoji veliki izbog mogućih rešenja po veoma različitim cenama, jasno je da se zadatak dodatno usložnjava.

Složenost problema dodatno uvećava činjenica da se navedene stavke ne mogu posmatrati zasebno, nego isključivo u sadejstvu u okvru čitavog objekta. Primera radi, orientacija objekta u prostoru direktno utiče na tip i veličinu prozora na pojedinim zidovima, kao i na temperaturu u unutrašnjosti, a samim tim i na potreban kapacitet grejnih i rashladnih uređaja. To za pozitivnu posledicu ima da se ne mora uvek težiti skupim HVAC sistemima zato što imaju dobre performanse ako te performanse ne mogu ili ne moraju biti iskorišćene. Ukoliko se podesno odabere tip i vrsta prozora za određene prostorije, može se desiti da se isti kvalitet unutrašnje regulacije temperature može postići i mnogo jeftinijim HVAC sistemom.

Shodno svemu navedenom, za problem optimalnog projektovanja energetski efikasne zgrade ne postoji jedinstveno „najbolje“ rešenje, nego čitav niz kombinacija elemenata, tj. mogućih rešenja, između kojih projektant ili investitor treba da odabere ono rešenje koje će predstavljati njemu prihvatljiv kompromis između ekološkog i ekonomskog aspekta problema.

Stoga se u fazi izrade idejnog rešenja prave i razmatraju različite kombinacije kako bi se iz njih izdvojio određeni broj rešenja koja su prihvatljiva iz jednog ili drugog razloga [Men 01, Mil 01]. Ovaj proces podrazumeva menjanje i rekombinovanje različitih konstruktivnih i tehnoloških elemenata i parametara, kao što su oblik i orijentacija zgrade, sastav i debljina zidova i sl. što može rezultirati smanjenjem emitovanja energije čak i do 40 % [Bak 00, Cof 99].

Još jedan bitan aspekt projektovanja energetski efikasnih zgrada jeste analiza životnog veka zgrade (*life cycle analysis - LCA*), budući da tzv. ukupni energetski bilans predstavlja veliki deo ukupne otpuštene energije tokom veka trajanja zgrade, čak 30–60% [Gus 10, Dod 11], kao i značajan doprinos ukupnoj emisiji gasova koji doprinose efektu staklene bašte [Sha 11]. Zbog toga podaci koji se dobijaju razmatranjem uštede energije samo u okviru eksploatacije objekta mogu biti varljivi [Ble 10], što znači da je analiza životnog ciklusa zgrade osetljivo pitanje, pogotovo na polju pasivnih i energetski efikasnih zgrada i da je zato neophodno uključuti je na adekvatan način u postupak optimizacije konstruktivnih elemenata i opreme. Stoga je LCA bitna stavka u projektovanju pasivnih i zelenih zgrada, koju je neophodno uzeti u obzir pri optimizaciji.

Složenost problema i veliki broj konstruktivnih, geometrijskih i tehničkih karakteristika koje u proračun ulaze kao promenljive i/ili uslovi ograničenja, ukazuje na to da klasični metod manje ili više nasumičnog izbora i probanja nije adekvatan za ovaj težak kombinatorni problem [Sha 96] te da bi stoga trebalo primeniti odgovarajuću tehniku višekriterijumske optimizacije. Za razliku od jednokriterijumske optimizacije, gde postoji samo jedno rešenje datog problema, višekriterijumska optimizacija ima za cilj da ponudi čitav niz rešenja (tzv. Pareto rešenja) koja u manjoj ili većoj meri zadovoljavaju zadate

kriterijume, tj. funkcije cilja. Analizom mogućih alternativa, ograničenja, praktičnih i arhitektonskih aspekata i ekonomskih aspekata ponuđenih rešenja, projektant je u poziciji da odabere najpovoljnije, tj. kompromisno rešenje.

4. Matematička formulacija problema

4.1 Definisanje geometrije i položaja objekta

U prikazanom istraživanju, geometrijski oblik objekta definisan je kao prost n-tostrani poligon zato što većina kompjuterskih programa za simulaciju i procenu potrošnje energije podrazumeva da su spoljašnji zidovi pravolinijskih osa. Ovakav pristup predstavlja podesnu osnovu za rad sa složenijim oblicima osnova, pa čak i za objekte s krivolinijskim zidovima, pošto se oni lako mogu aproksimirati pravolinijskim segmentima čiji će dužina i broj zavisiti od finoće aproksimacije. Proizvoljan n-tostrani poligon može se opisati na različite načine, među kojima su najčešći prikazi dužina-ugao i dužina-nagib, i to u Dekartovom ili polarnom koordinatnom sistemu. Adekvatan izbor načina opisivanja poligona i koordinatnog sistema može bitno uticati na konvergenciju optimizacijskog algoritma, a samim tim i na vreme neophodno za sprovođenje proračuna.

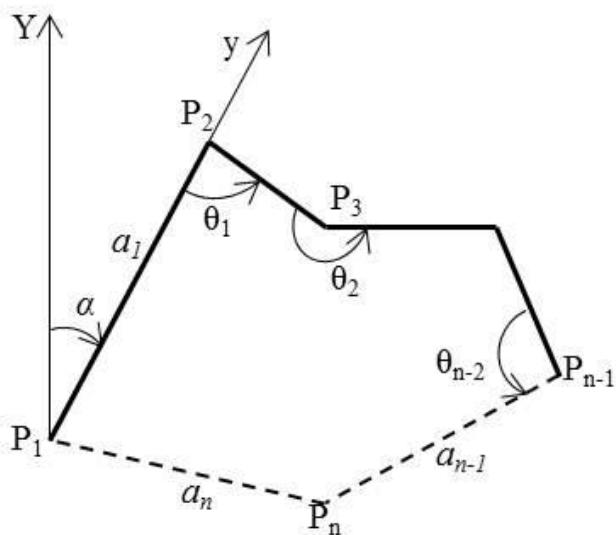
4.1.1 Prikaz dužina-ugao

Kako se svaki poligon sastoji od određenog broja sekvenčijalnih pravolinijskih segmenata (tj. stranica), intuitivno se nameće ideja o opisivanju tog poligona preko dužina stranica i uglova između njih. Na taj način se za zadatu površinu S može definisati n-to strani poligon putem sledećih koraka (Slika 4.1):

- Ako se kao polazna tačka uzme teme P_1 , na osnovu dužine prve stranice (a_1) i orientacije zgrade u prostoru (α) mogu se odrediti koordinate narednog temena P_2 , gde se za ugao α može uzeti između y osa lokalnog i globalnog koordinatnog sistema ili između odabrane referentne stranice poligona i stvarnog severa, što je

ovde slučaj, budući da je to kod svih programa za simulaciju utroška energije neophodan podatak za opisivanje geometrije objekta. Stoga se orijentacija zgrade u prostoru definiše kao ugao između realnog severa i referentne stranice poligona, pri čemu se pozitivnim smatra smer kazaljke na satu.

- Pravac i -te stranice, koja spaja temena P_i i P_{i+1} , definisan je uglom θ_{i-1} mereno u smeru suprotnom od kazaljke na satu u odnosu na prethodnu stranicu, pri čemu treba imati u vidu da je ugao θ_{i-1} unutrašnji ako se stranice nižu u pozitivnom smeru, a spoljašnji ako se nižu u negativnom smeru. Kad je pravac i -te stranice tako definisan, koordinate temena P_{i+1} i -te stranice biće određen njenom dužinom a_i . Ovaj postupak ponavlja se sve dok se ne odredi pravac stranice $n-1$.
- Položaj poslednje temena poligona, P_n , određuje se na osnovu uslova da ukupna površina poligona mora biti jednaka zadatoj površini S .



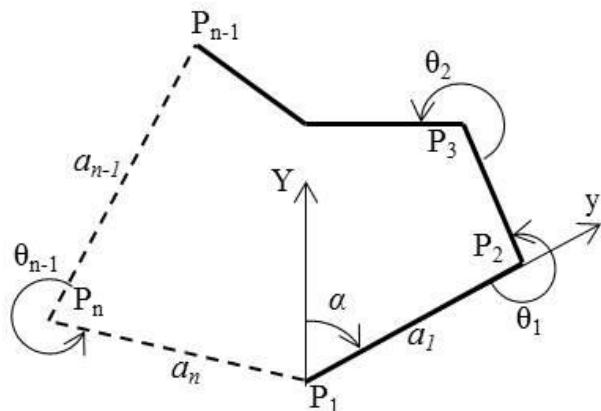
Slika 4.1 Prikaz dužina-ugao

Primenom ovog pristupa, za opisivanje oblika objekta potrebne su ukupno $2n - 3$ promenljive, a to su ugao orientacije objekta (α), dužine prve $n - 2$ ivice (a_1, a_2, \dots, a_{n-2}) i prvih $n - 2$ uglova između stranica ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-2}$). Granične vrednosti svake promenljive mogu se definisati tako da konačan oblik poligona bude u okvirima projektantski zadatih uslova vezano za svojstva objekta. Primera radi, može se unapred usvojiti minimalna dopustiva vrednost ugla između susednih zidova kako bi se izbegli neupotrebljivi i neiskoristivi prostori unutar objekta.

Kako su sve dužine i uglovi (osim za poslednje ivice) eksplisitne promenljive, za njih se mogu propisati uslovi ograničenja kako bi se izbegli nepodesni oblici osnove objekta, što je ujedno bitna prednost ovakvog načina opisivanja oblika budući da svi optimizacijski algoritmi strogo poštuju zadata ograničenja, čime se nepovoljna rešenja odmah eliminišu iz daljeg razmatranja. Međutim, prikaz stranica-ugao ima dve otežavajuće okolnosti vezano za binarno kodiranje za potrebe genetskih algoritama.

Prvo problem je epistaza, što je termin koji se u polju genetskih algoritama koristi za opisivanje problema interakcije gena, odnosno za situacije kad jedan gen maskira ili modifikuje svojstva ostalih [Dav 91, Nau 00]. Što je nivo epistaze viši, to je algoritmu teže da locira lokalni optimum funkcije cilja. U oblikovanju zgrada, svaka fasada se opisuje površinom i orientacijom, što su podaci koji direktno proističu iz dužine i položaja korespondentne stranice poligona. Dužine stranica poligona modeliraju se kao nezavisne i eksplisitne promenljive, tako da ne mogu dovesti do pojave epistaze. S druge strane, nagib svake stranice je implicitno data promenljiva koja proističe iz orientacije zgrade i svih prethodnih uglova između ivica. Tako, na primer, položaj pete stranice zavisi od pet prethodno utvrđenih podataka, tj. od orientacije zgrade (α) i uglova θ_1 do θ_4 . Stoga promena bilo kog ugla u poligonu direktno utiče na promenu svih narednih uglova, što može dovesti do ozbiljnih epistatičkih problema.

Druga teškoća je mogućnost pojave kodnog izomorfizma, odnosno do toga da hromozomi s različidnim binarnim zapisima mogu da mapiraju istu jedinku u prostoru pretrage, što dovodi do redundantnosti rešenja, tj. do toga da se genetskim operatorima ne dobijaju korisne informacije o okolini date jedinke [Ron 95]. Kod prikaza objekta primenom principa dužina-ugao javlja se kodni izomorfizam kao posledica široke mogućnosti izbora polazne ivice. Na primer, slike 4.1 i 4.2 prikazuju isti poligon, ali opisan različitim vrednostima promenljivih, što je posledica različitog izbora polazne ivice.



Slika 4.2 Problem kodnog izomorfizma

Problem epistaze može se izbeći ako se položaj svake ivice u prostoru opiše eksplicitno datom promenljivom, što je suština prikaza dužina-nagib.

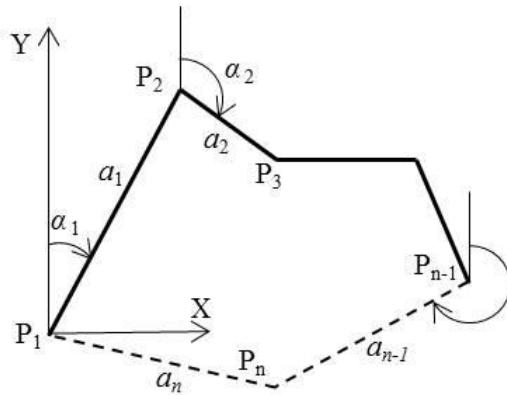
4.1.2 Prikaz dužina-nagib

Prikaz dužina-nagib ima dve bitne odlike po kojima se razlikuje od prethodnog pristupa. Prvo, položaj proizvoljne stranice poligona ne definiše se preko ugla koji ona zaklapa s prethodnom, nego preko njenog nagiba, odnosno ugla koji zaklapa s y osom globalnog koordinatnog sistema (ili u odnosu na sever). Drugo, i posledično, ovime se eliminiše orientacija objekta (α) kao podatak, budući da je sada zamenjuje ugao nagiba referentne prve stranice. Uvođenjem ovih dveju izmena, prvci ivica postaju nezavisne promenljive, čime se smanjuje interakcija gena.

Postupak opisivanja n-tostranog poligona primenom pristupa stranica-nagib može se opisati sledećim koracima (Slika 4.3):

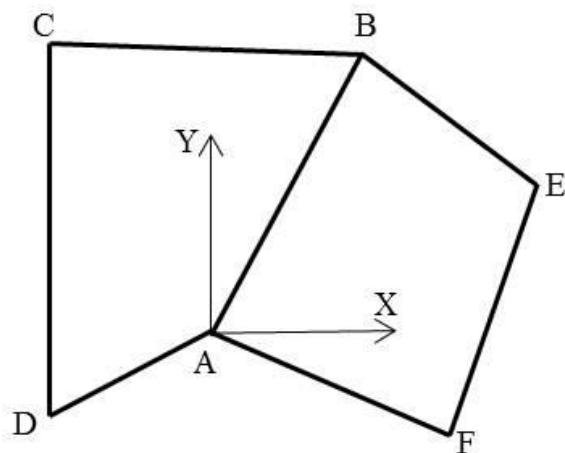
- Polazeći od prvog temena P_1 , na osnovu dužine prve stranice (a_1) i njenog nagiba (α_1) mogu se odrediti koordinate temena P_2 .
- Na isti način se koordinate temena P_{i+1} određuju na osnovu koordinata prethodnog temena P_i , dužine ivice a_i i njenog nagiba α_i . Ovaj postupak se ponavlja sve dok se ne odrede koordinate temena P_{n-1} .
- Položaj poslednjeg temena, P_n , određuje se na osnovu nagiba α_{n-1} i uslova da ukupna površina poligona mora biti jednaka zadatoj.

Shodno navedenom, u primeni pristupa dužina-nagib za opisivanje n-tostranog poligona neophodno je ukupno $2n - 3$ promenljivih, a to su uglovi nagiba i dužine ivica $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{n-2}, \alpha_{n-1}$ i α_{n-1} .



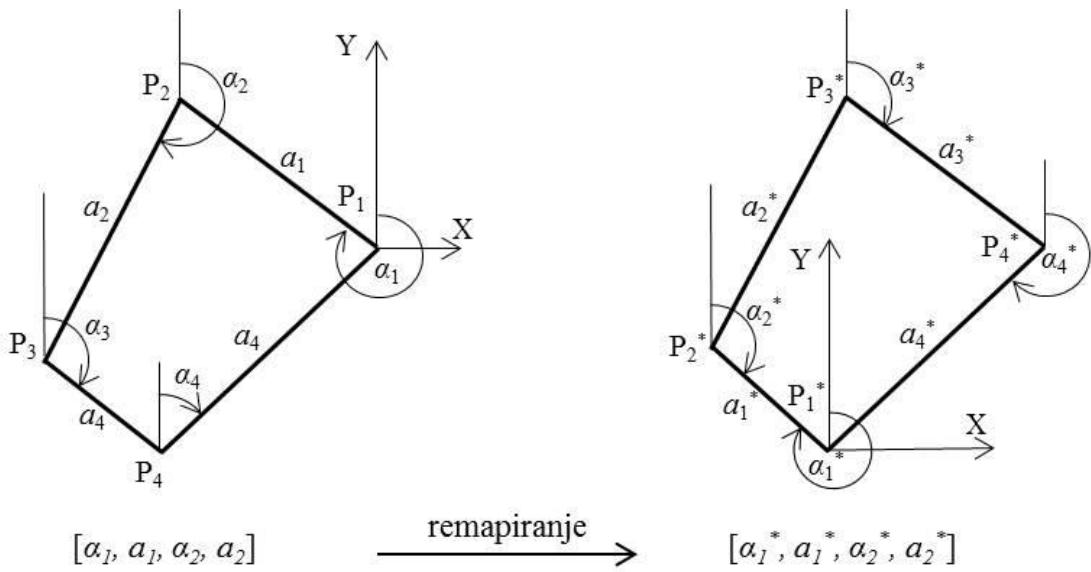
Slika 4.3 Prikaz dužina-nagib

Iako se na ovaj način značajno smanjuje nivo interakcije gena, i dalje preostaje mogućnost pojave epistatičkog problema jer za svaku ivicu i dalje postoje dve moguće orientacije u kontekstu unutrašnje i spoljašnje strane objekta, a izbor između njih zavisi od toga kako ostale ivice zatvaraju poligon. Na primeru prikazanom na Slici 4.4 zid prikazan stranicom AB ima različitu orientaciju za objekte ABCD i ABEF. Pored toga, i u ovom pristupu javlja se problem kodnog izomorfizma, koji se može rešiti remapiranjem temena poligona.



Slika 4.4 Epistatički problem

Remapiranje je postupak kojim se obezbeđuje singularnost, odnosno jedinstvenost odnosa između genotipa i fenotipa, što se postiže eliminisanjem bilo kakve proizvoljnosti u raspoređivanju temena. U istraživanju prikazanom u ovoj disertaciji, jedinstvenost rasporeda temena obezbeđena je poštovanjem sledeća dva pravila: (1) za svaku stranicu poligona, donje levo teme je prva tačka a gornje desno druga, i (2) temena se nižu u smeru kazaljke na satu, a čim se u genotipu pojavi rešenje koje ne zadovoljava ova dva pravila, primenjuje se remapiranje. Tako, na primer, levi petougao na Slici 4.5 krši oba pravila, tako da se dato rešenje remapiranjem u potpunosti menja u genotipu, ali na nivou fenotipa ostaje isto.



Slika 4.5 Sprečavanje izomorfizma i epistaze primenom remapiranja

4.1.3 Dekartove i polarne koordinate

Kako su Dekartov i polarni koordinatni sistem međusobno ekvivalentni (jer postoje kanonske transformacije iz jednog u drugi), u daljem će se razmatrati samo prikaz u Dekartovim koordinatama. U Dekartovom koordinatnom sistemu, položaj svakog temena eksplisitno je definisan njegovim koordinatama, što znači da je za jednoznačno određivanje n-tostranog poligona potrebno $2n - 3$ promenljivih ($x_2, y_2, \dots, x_{n-1}, y_{n-1}, x_n$ (ili y_n)), jer se podrazumeva da se prvo teme nalazi u koordinatnom početku, a da se preostala koordinata poslednjeg temena (y_n ili x_n , respektivno) određuje na osnovu unapred zadate površine poligona.

U poređenju s prikazom dužina-nagib, Dekartove koordinate imaju nekoliko bitnih nedostataka, od kojih je najveći viši nivo epistaze, pošto i dužina i nagib svake ivice direktno zavise od koordinata temena koja je određuju što znači da je za definisanje te stranice potrebno četiri podatka, odnosno za dva više nego u prikazu dužina-nagib. Pored toga, generiše se više neodgovarajućih rešenja, odnosno onih u kojima postoji presek nesusednih stranica ili su narušeni zadati uslovi ograničenja u pogledu dužine stranica i veličine unutrašnjih uglova. Kako su u Dekartovim koordinatama i dužine stranica i uglovi implicitne promenljive jer proističu iz koordinata temena, ovaj vid definisanja poligona podložniji je pojavi neodgovarajućih rešenja, što može značajno da uspori proces optimizacije. Iz napred navedenih razloga zadavanje razumnih graničnih vrednosti koordinata temena mnogo je teže i ne može se izvršiti intuitivno, pogotovo za objekte veće površine, budući da previše mali intervali ne mogu da pokriju ceo prostor pretrage, dok previše veliki iziskuju više vremena za konvergenciju.

Iz navedenog je jasno da opisivanje poligona Dekartovim i polarnim koordinatama nije podesno za datu problematiku, tako da ova dva pristupa nisu razmatrana u nastavku istraživanja, nego su analizirani samo pristupi dužina-ugao i dužina-nagib.

4.1.4 Usvojeni pristup

Kako su oba razmatrana pristupa metodološki veoma slična, u nastavku će biti podrobno objašnjen samo pristup dužina-nagib. Kao što je već rečeno, poligon je u ovom pristupu definisan unapred zadatom površinom S i sa $2n - 3$ promenljivih, odnosno dužinama stranica a_1, \dots, a_{n-2} i uglovima nagiba $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$. Ako poznate vrednosti ovih promenljivih, poligon se može jednoznačno definisati u sledećih devet koraka.

Korak 1. Izračunavanje uglova $\theta_i, i = 1, \dots, n - 2$:

$$\theta_i = \begin{cases} 180 + \alpha_i - \alpha_{i+1} & \text{za } (-180 \leq \alpha_i - \alpha_{i+1} \leq 180) \\ 540 + \alpha_i - \alpha_{i+1} & \text{za } (\alpha_i - \alpha_{i+1} < -180) \\ -180 + \alpha_i - \alpha_{i+1} & \text{za } (\alpha_i - \alpha_{i+1} > 180) \end{cases} \quad (4.1)$$

gde je α_i nagib i -te stranice u stepenima a θ_i ugao u stepenima meren u smeru kazaljke na satu između i -te i $(n - 1)$ stranice poligona.

Pri tome mogu nastupiti dva specijalna slučaja. Prvi je $\alpha_i = \alpha_{i+1}$, odnosno da su dve susedne stranice kolinearne i isto orijentisane, što direktno vodi smanjenju broja stranica i temena, dok je drugi $\alpha_i - \alpha_{i+1} = \pm 180$, odnosno da su susedne stranice kolinearne i suprotno orijentisane, što je nedopustivo i takvo rešenje se automatski odbacuje.

Korak 2. Provera jesu li svi uglovi $\theta_i, i = 1, \dots, n - 2$ u okviru zadatih intervala ograničenja. Ukoliko jesu, prelazi se na naredni korak, a ako nisu, to rešenje se automatski odbacuje. Granične vrednosti uglova obično se usvajaju tako da se dobiju smisleni, upotrebljivi oblici objekata i/ili prostorija. Primera radi, može se usvojiti da su neprihvativi uglovi manji od 15° i veći od 345° .

Korak 3. Izračunavanje koordinata temena $P_i, i = 1, \dots, n - 1$. Ako se koristi Dekartov koordinatni sistem u kome se x-osa pruža ka istoku a y-osa ka

severu, a prvo teme poligona P_1 je u koordinatnom početku, odnosno ($x_1 = 0$, $y_1 = 0$), koordinate preostalih temena određuju se na osnovu izraza:

$$x_{i+1} = x_i + a_i \sin \alpha_i \quad (4.2)$$

$$y_{i+1} = y_i + a_i \cos \alpha_i \quad (4.3)$$

gde je a_i dužina i-te stranice poligona u metrima.

Korak 4. Provera postoji li u prve $n - 2$ stranice presek nesusednih. Ako postoji, to rešenje se automatski odbaciće, a ako ne postoji, prelazi se na naredni korak. Ova provera se sprovodi primenom postupka podrobno opisanog u [Rou 98], kojim se utvrđuje da li krajnje tačke jedne stranice leže s iste strane druge stranice ili ne.

Korak 5. Izračunavanje dužine ivice a_{n-2} i provera jesu li temena P_1 do P_n raspoređena u smeru kazaljke na satu ili u obratnom smeru, rpi čemu se koordinate temena P_n izračunavaju kao:

$$x_n = x_{n-1} + a_{n-1} \sin \alpha_{n-1} \quad (4.4)$$

$$y_n = y_{n-1} + a_{n-1} \cos \alpha_{n-1} \quad (4.5)$$

Zatim se, u zavisnosti od rasporeda temena, površina poligona može izraziti na sledeći način:

$$S = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) & \text{suprotno od kazaljke na satu} \\ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) & \text{u smeru kazaljke na satu} \end{cases} \quad (4.6)$$

gde je S površina poligona u m^2 , $x_{n+1} = x_1 = 0$ i $y_{n+1} = y_1 = 0$.

Ako se ima u vidu da je površina S unapred zadata, kada se u jednačine 3.6 umesto vrednosti x_n i y_n unesu izrazi 4.4 i 4.5, tada kao jedina nepoznata u tim jednačinama preostaje a_{n-1} i njena vrednost se izračunava za oba slučaja. Ako se primenom gornje jednačine dobije pozitivna vrednost a_{n-1} , onda su temena raspoređena u smeru suprotnom od kazaljke na satu, a ako se pozitivna vrednost dobije iz donje jednačine, temena su raspoređena u smeru kazaljke na satu, dok se u suprotnom razmatrano rešenje odbacuje. Na kraju se proverava da li je dobijena vrednost a_{n-1} unutar definisanog intervala dopuštenih vrednosti. Ukoliko jeste, prelazi se na sledeći korak, a ukoliko nije, rešenje se odbacuje.

Korak 6. Provera da li se poslednje dve stranice seku s nekom od nesusednih, tj. sa stranicama a_1 do a_{n-2} . Ukoliko se seku, to rešenje se odbacuje, a ukoliko se ne seku, prelazi se na naredni korak. Provera se obavlja na isti način kao u četvrtom koraku.

Korak 7. Izračunavanje dužine poslednje stranice a_n i vrednosti uglova θ_{n-1} i θ_n . Na osnovu dužine a_{n-1} sračunate u petom koraku, primenom jednačina 4.4 i 4.5 izračunavaju se koordinate poslednjeg temena P_n , a zatim se iz njih i koordinata temena P_1 izračunava dužina stranice a_n . Zatim se na osnovu te dužine primenom 4.2 ili 4.3 određuje nagib poslednje stranice (α_n), a kako je to bio poslednji nepoznati nagib, primenom jednačine 4.1 mogu se izračunati uglovi u temenima θ_{n-1} i θ_n .

Korak 8. Provera validnosti dobijenog rešenja. Ukoliko se bilo koja od dobijenih vrednosti nalazi izvan intervala ograničenja, rešenje se odbacuje. U suprotnom, dobijeni poligon predstavlja moguću alternativu za osnovu datog objekta jer zadovoljava sva propisana ograničenja i zahteve u pogledu geometrije.

Korak 9. Po potrebi se sprovodi postupak remapiranja.

4.2 Promenljive

Promenljive koje se razmatraju u predmetnom istraživanju mogu se generalno podeliti u četiri grupe, a to su promenljive kojima se opisuju oblik osnove, tip konstrukcije, struktura konstrukcije i tip nadstrešnica.

U predmetnom istraživanja razmatrana su dva različita pristupa u opisivanju osnove objekta (dužina-ugao i dužina-nagib). U pristupu dužina-ugao, oblik osnove i orijentacija objekta definišu se preko orijentacije objekta (α), dužina ivica (a_1, \dots, a_{n-2}) i temenih uglova ($\theta_1, \dots, \theta_{n-2}$), dok se u pristupu dužina-nagib koriste dužine stranica poligona (a_1, \dots, a_{n-2}) i nagibi stranica ($\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$). Sve navedene promenljive mogu biti diskretne ili kontinualne. Razmatrana su dva tipa konstrukcije – čelični i betonski ramovski sistem i za svaki od njih definisani su odgovarajući slojevi zidova i tipovi nadstrešnica.

Struktura konstrukcije podeljena je na zidove, podove, krov i prozore. Zidovi i podovi raščlanjeni su na slojeve, pri čemu redosled i debljina slojeva zavisi od tipa zida. Stoga su tipovi zidova i njihovi slojevi tretirani kao diskretne promenljive, tj. unapred su definisane moguće kombinacije i formiran je katalog. Isti princip je primenjen i za krovove, kao i za raspoložive tipove prozora, koji su shodno tome takođe diskretne promenljive, dok je veličina prozora definisana odnosom površine zida i prozora kao diskretnom promenljivom. Podrobno obrazloženje takvog pristupa može se naći u [Mil 12a].

Konstrukcija nadstrešnice je u direktnoj vezi s tipom prozora. U predmetnom istraživanju razmatrani su kontinualni prozori koji se protežu čitavom dužinom fasade, te je zato dužina nadstrešnica jednaka dužini zida, dok je dubina nadstrešnice (odstojanje njenog kraja od površine zida) kontinualna promenljiva, kao i visina nadstrešnice (odstojanje od gornje ivice prozora). Kako je delotvornost nadstrešnice direktno vezana za orijentaciju fasade, tj. za izloženost sida suncu, prisustvo nadstrešnice može biti i nepoželjno, pa se zato nadstrešnica razmatra za svaki zid ponaosob, uz uzimanje u obzir i mogućnosti da na zidu nema nadstrešnice.

4.3 Funkcije cilja

Funkcije cilja predstavljaju kvantifikovani opis željenih performansi objekta. U redmetnom istraživanju, traži se minimizacija uticaja na okolinu (LCEI) i ukupnih troškova (LCC) tokom čitavog životnog veka objekta, što se može zapisati kao:

$$\text{Min: } LCC_{(X)} = IC_{(X)} + OC_{(X)} \quad (4.7)$$

$$\text{Min: } LCEI_{(X)} = EE_{(X)} + OE_{(X)} \quad (4.8)$$

gde je X vektor razmatranih promenljivih, IC je cena gradnje objekta, OC je ukupan iznos troškova tokom životnog ciklusa objekta uključujući i utrošak energije, EE je uticaj na okruženje tokom gradnje objekta, a OE je uticaj na okruženje tokom eksploatacije objekta, tj. usled grejanja, hlađenja i osvetljavanja.

U predmetnom istraživanju, uticaj objekta na okolinu definisan je kao kumulativna potrošnja egzergije [Wan 05], gde se pod egzergijom podrazumeva termodinamički koncept definisan kao „količina rada potrebna da se neka materija dovede u stanje termodinamičke ravnoteže pri interakciji s datim komponentama prirodnog okruženja putem reverzibilnih procesa“ [Sza 98]. Kumulativna potrošnja egzergije sastoji se od dve komponente, a to su primarna i sekundarna potrošnja egzergije.

Primarna potrošnja egzergije obuhvata energiju iz prirodnih izvora utrošenu u eksploataciji objekta tokom čitavog njegovog životnog ciklusa ali i tokom gradnje, što podrazumeva i iskopavanje, proizvodnju i transport materijala.

Sekundarna potrošnja egzergije odnosi se na neophodne operacije u cilju uklanjanja ili reciklaže otpadnog materijala tokom eksploatacije objekta, pri čemu se pod pojmom „otpadni materijal“ pre svega podrazumeva emisija gasova u vazduh, prevashodno tri osnovna gase u izazivanju efekta staklene bašte (ugljen-dioksid, metan i azot-monoksidi).

Pri proračunu vrednosti funkcija cilja, za cenu konstrukcije i troškove gradnje korišćeni su ulazni podaci preuzeti iz baze [RSM 04] dok je proračun uticaja na okolinu dobijen primenom softvera Athena [ATH 03]. Za zadati skup vrednosti promenljivih, simulacioni program generiše ulazni tekstualni fajl u kome su definisane površine i orientacije svih spoljašnjih zidova, njihova fizička i termalna svojstva, kao i prisustvo i svojstva nadstrešnica. Za tako definisane elemente konstrukcije, simulacioni program izračunava ukupnu potrošnju energije i troškove tokom eksploatacije objekta (OE) i tokom gradnje (OC), dok se uticaji na okolinu i cena gradnje (EE i IC, respektivno) direktno određuju iz geometrije objekta i predmeta i predračuna. Podrobniji opis navedenog pristupa može se naći u [Wan 05].

Problem definisan navedenim funkcijama cilja predstavlja zapravo je problem višekriterijumske optimizacije sa suprotstavljenim kriterijumima. Shodno tome, kao što je već rečeno, ne postoji jedno optimalno rešenje, nego čitav niz prihvatljivih rešenja, koja se nazivaju Pareto rešenja, a ona čine tzv. Pareto front, o čemu će biti više rečeno u narednom poglavlju. Analiza celokupnog Pareto fronta pruža korisne informacije o odnosu i međuzavisnosti cene i energetske efikasnosti objekta, što donosi ocenu odluke (projektantu ili investitoru) omogućava da razmotri različite alternative i odabere rešenje koje će predstavljati zadovoljavajući kompromis između suprotstavljenih i raznorodnih ciljeva.

4.4 Uslovi ograničenja

Uslovima ograničenja se limitira opseg dopuštenih vrednosti svake promenljive. U zavisnosti od broja i tipa razmatranih promenljivih, ograničenja se mogu razvrstati u tri grupe, a to su: intervalska ograničenja, selekciona ograničenja i funkcionalna ograničenja.

Intervalskim ograničenjima definiše se raspon dopuštenih vrednosti, odnosno granične vrednosti kontualnih promenljivih. Na primer, ako je dužina stranice poligona kontinualna promenljiva, može se propisati da ona ne sme biti manja od 5,0 m niti veća od 50,0 m, odnosno $5,0 \leq l_i \leq 50,0$.

Selekpcioni uslovi ograničenja primenjuju se za diskretne promenljive kod kojih se vrednost date promenljive bira iz unapred definisanog skupa ponuđenih vrednosti, takozvanog kataloga. Primera radi, ako na raspolaganju ima šest različitih vrsta prozora od kojih je svaki tip definisan brojem od 1 do 6, tako da je promenljiva koja definiše tip prozora celobrojna i predstavlja kataloški broj datog tipa prozora, tj. može imati jednu od šest vrednosti kataloških brojeva.

Funkcionalnim ograničenjima se obično uspostavljaju i rpopisuju veze između promenljivih. Sve implicitno date promenljive vezane za oblik zapravo su funkcionalne promenljive jer se njihove vrednosti izvode iz eksplisitnih promenljivih. Primera radi, u pristupu dužina-ugao je dužina poslednje stranice funkcija svih eksplisitnih promenljivih a_1 do a_{n-2} i θ_1 do θ_{n-2} . Ako pri tom postoji i ranije pomenuto ograničenje dužine, to se može napisati kao $5,0 \leq f(a_1, \dots, a_{n-2}, \theta_1, \dots, \theta_{n-2}) \leq 50,0$.

4.5 Višekriterijumski genetski algoritam

Matematička formulacija predmetnog svodi se na dve funkcije cilja koje sadrže raznorodne, tačnije i diskretne i kontinualne promenljive. Stoga se kao podesna metoda za rešavanje problema ovog tipa nameće višekriterijumski genetski algoritam, budući da se ta metaheuristika pokazala vrlo delotvornom u rešavanju složenih kombinaornih problema [Gri 02, Cal 03]. Velika prednost višekriterijumskog genetskog algoritma leži u njegovoj sposobnosti da u samo jednom proračunu locira veliki broj Pareto optimalnih rešenja, pri čemu se rešenje smatra Pareto optimalnim ako i samo ako u oblasti pretraživanja ne postoji rešenje koje je dominantno u odnosu na njega. Ako rešenje X_1 dominira nad rešenjem X_2 , to znači da X_1 nije inferiorno u odnosu na X_2 ni po jednom od kriterijuma a da je pri tom bolje od rešenja X_2 bar po jednom kriterijumu. Skup svih Pareto rešenja jednog problema naziva se Pareto set ili Pareto front.

U prikazanom istraživanju, prva generacija rešenja, tj. polazna populacija sastoji se u celini od potencijalno odgovarajućih rešenja, što se obezbeđuje tako što se nakon dekodiranja proverava pogodnost svake jedinke – ako jedinka predstavlja prost poligon i pri tom zadovoljava sve uslove ograničenja, onda ulazi u populaciju, a u suprotnom se odbacuje.

U daljim generacijama smatra se da nepodobne jedinke inferiorne u odnosu na sve podobne, što znači da u kasnijim generacijama mogu postojati nepodobne jedinke, tj. one u kojima postoji presecanje nesusednih stranica poligona ili nije zadovoljen neki od uslova ograničenja, ali se program za simulaciju poziva samo za podobne jedinke i samo za njih se računa vrednost funkcija cilja.

Najjače jedinke pronađene tokom procesa evolucije čuvaju se primenom elitističke strategije putem eksterne populacije [Fon 98]. Kako se kapacitet eksterne populacije zadaje unapred, može se dogoditi da u nekoj od podoblasti pretrage postoji veća gustina elitnih jedinki i tada se izvestan broj takvih jedinki odbacuje tehnikom klastera [Zit 99].

Kako bi se ubrzala konvergencija genetskog algoritma, pri izboru jedinki koje će ući u proces ukrštanja uvek ulazi izvestan broj elitnih jedinki iz eksterne populacije, dok se preostale uzimaju iz prethodne populacije metodom binarne turnirske selekcije.

Kako bi se obezbedilo da genetski algoritam dobro pokrije čitav prostor pretrage, razmena genetskog materijala između sličnih jedinki reguliše se operatorom ukrštanja, pri čemu se ova restrikcija uvodi tek za drugu polovinu generacija. Drugim rečima, jedinke se pare samo ako se obe nalaze unutar propisanog radiusa parenja, tj. ako je njihovo euklidsko odstojanje manje od propisanog, pri čemu se euklidsko odstojanje izračunava kao [Deb 01]:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_m \left(\frac{f_i^m - f_j^m}{f_{\max}^m - f_{\min}^m} \right)^2} \quad (4.9)$$

gde je d_{ij} odstojanje između jedinki i i j , m predstavlja indeks funkcije cilja a indeksi \min i \max označavaju minimalnu i vrednost posmatrane funkcije cilja f^m u dатој populaciji.

Kako simulacionim programima treba relativno mnogo vremena za proračun, proces se značajno ubrzava time što se nakon formiranja nove populacije primenjuje kontrola ponavljanja, što znači da se svaka jedinka nove populacije poredi s jedinkama prethodne. Ukoliko je došlo do ponavljanja nekog hromozoma, vrednosti funkcija cilja direktno se kopiraju bez pokretanja simulacionog programa.

Kako se zbog velikog broja promenljivih u problemu i složenosti programa zbog korišćenja potprograma za statički proračun i za proračun energetskih performansi objekta klasični genetski algoritam pokazao kao nepodesan, pre sve ga zbog utroška vremena ali i zbog relativno česte pojave završetka pretrage i nagomilavanja rešenja u okolini lokalnog optimuma jedne ili druge funkcije cilja umesto u globalnom, u predmetnom istraživanju korišćeni su

samoprilagođavajući operatori ukrštanja (p_c) i mutacije (p_m) [Ham 00, Toč 06]. Kao polazna za tačka za razvijanje adekvatnih formulacija samoprilagođavajućih operatora uzeta su rešenja koja su dali [Toč 06, Rui 09, Bar 03, Mil 12a, Mil 14], pa su njihovom modifikacijom i kombinovanjem dobijene nove formulacije samoprilagođavajućih genetskih operatora koji su korišćeni pri proračunu. Na taj način dobijeni su operator ukrštanja (p_c), dat jednačinama 4.10-a i 4.10-b i operator mutacije (p_m), dat jednačinama 4.11-a i 4.11-b:

$$p_c = \frac{1}{4} \frac{f_{max} - f'}{f_{max} - f_{sr}} \quad \text{ako je } f' \geq f_{sr} \quad (4.10\text{-a})$$

$$p_c = 1,0 \quad \text{ako je } f' < f_{sr} \quad (4.10\text{-b})$$

$$p_m = \frac{1}{8} \frac{f_{max} - f}{f_{max} - f_{sr}} \quad \text{ako je } f \geq f_{sr} \quad (4.11\text{-a})$$

$$p_m = \frac{f_{sr} - f}{f_{sr} - f_{min}} \quad \text{ako je } f < f_{sr} \quad (4.11\text{-b})$$

gde je:

- f – vrednost funkcije prilagođenosti razmatrane jedinke;
- f_{sr} – prosečna vrednost funkcije prilagođenosti u tekućoj populaciji;
- f_{max} – najveća vrednost funkcije prilagođenosti u tekućoj populaciji;
- f_{min} – najmanja vrednost funkcije prilagođenosti u tekućoj populaciji;
- f' – manja od vrednosti funkcije prilagođenosti jedinki koje se ukrštaju.

Tariranje i testiranje samoprilagođavajućih operatora ukrštanja i mutacije obavljeno je primenom standardnog paketa za testiranje metoda pretrage *G-Suite* [Flo 87, Him 72, Hoc 81, Koz 99, Mic 96], koji se sastoji od jedanaest problema za koja su poznata tačna rešenja. Formulacije problema date su u Prilogu 1 disertacije, dok su u tabelama 4.1 i 4.2 dati su najbolji, prosečni i najgori rezultati testiranja za sto i petsto generacija, dok su u tabelama 4.3 – 4.6 dati uporedni prikazi dobijenih rezultata i rezultata koje su dobili drugi autori. Iz navedenih rezultata može se zaključiti da prikazani pristup daje zadovoljavajuće rezultate.

Tabela 4.1 Rezultati testiranja na paketu G-Suite za 100 generacija

Test	Tačan	Najbolji	Prosečni	Najgori
G01	-15	-15.00	-14.7841	-14.6821
G02	0.803619	0.803002	0.771101	0.7524
G03	-1.000	-1.01002	-1.263645	-1.69367
G04	-30665.539	-30664.7879	-30660.21541	-30655.65328
G05	5126.4981	5126.824121	5222.47581	5277.34675
G06	-6961.81388	-6961.042659	-6947.7147	-6923.15948
G07	24.3062091	24.677244	24.852741	25.00807
G08	-0.095825	-0.0958250	-0.1002004	-0.102757
G09	680.6300573	680.782244	681.67784	682.00582
G10	7049.3307	7050.84951	7050.998841	7055.654258
G11	0.75	0.75114	0.76588	0.77077

Tabela 4.2 Rezultati testiranja na paketu G-Suite za 500 generacija

Test	Tačan	Najbolji	Prosečni	Najgori
G01	-15	-15.00	-14.886	-14.7006
G02	0.803619	0.803615	0.79077	0.79023
G03	-1.000	1.0007	0.9977	0.9788
G04	-30665.539	-30665.536	-30665.520	-30665.50
G05	5126.4981	5126.505	5130.954	5139.818
G06	-6961.81388	-6961.810	-6961.805	-6961.800
G07	24.3062091	24.3125	24.4127	25.0846
G08	-0.095825	-0.0958250	-0.095810	0.0958141
G09	680.6300573	680.6305	680.621	680.7455
G10	7049.3307	7049.401	7050.141	7050.805
G11	0.75	0.7501	0.7588	0.760

Tabela 4.3 Uporedni prikaz dobijenih rezultata i rezultata koje su dobili Hamida i Schoenauer [Ham 02]

Test	Tačan	Najbolji		Prosečni	
			[Ham 02]		[Ham 02]
G01	-15.0	-15.00	-15.00	-14.886	-14.84
G02	0.803619	0.803615	0.785	0.79077	0.59
G03	1.0	1.0007	1.0	0.9977	0.99989
G04	-30655.539	-30665.536	-30665.5	-30665.520	-30665.5
G05	5126.4981	5126.505	5126.5	5130.954	5141.65
G06	-6961.814	-6961.810	-6961.81	-6961.805	-6961.81
G07	24.306	24.3125	24.3323	24.4127	24.6636
G08	0.0958250	0.0958250	0.095825	0.095810	0.095825
G09	680.630	680.6305	680.630	680.621	680.641
G10	7049.33	7049.401	7061.13	7050.141	7497.434
G11	0.75	0.7501	0.75	0.7588	0.75

Tabela 4.4 Uporedni prikaz dobijenih rezultata i rezultata koje su dobili Toğan i Daloğlu [Toğ06]

Test	Tačan	Najbolji		Prosečni		Najgori	
			[Toğ 06]		[Toğ 06]		[Toğ 06]
G01	-15.0	-15.00	-15.00	-14.886	-15.00	-14.7006	-15.00
G02	0.803619	0.803615	0.7998570	0.79077	0.7614353	0.79023	0.6509022
G03	1.0	1.0007	1.000307	0.9977	0.9996680	0.9788	0.9883835
G04	-30655.54	-30665.536	-30665.51	-30665.520	-30665.30	-30665.50	-30664.81
G05	5126.4981	5126.505	5126.571	5130.954	5389.350	5139.818	6030.599
G06	-6961.814	-6961.810	-6961.896	-6961.805	-6961.796	-6961.800	-6960.796
G07	24.306	24.3125	24.85824	24.4127	27.9988	25.0846	30.07281
G08	0.0958250	0.0958250	0.0958850	0.095810	0.0948582	0.0958141	0.0815763
G09	680.630	680.6305	680.6678	680.621	680.9680	680.7455	682.6396
G10	7049.33	7049.401	7080.107	7050.141	8018.938	7050.805	8977.767
G11	0.75	0.7501	0.75	0.7588	0.75	0.760	0.75

Tabela 4.5 Uporedni prikaz dobijenih rezultata i rezultata koje su dobili Runarsson i Yao [Run 00]

Test	Tačan	Najbolji		Najgori	
			[Run 00]		[Run 00]
G01	-15,0	-15,00	-15,00	-14.7006	-15,00
G02	0,803619	0,803615	0,803515	0,79023	0,726288
G03	1,0	1,0007	1,0	0,9788	1,00
G04	-30655,539	-30665,536	-30665,539	-30665,50	-30665,539
G05	5126,4981	5126,505	5126,497	5139,818	5142,472
G06	-6961,814	-6961,810	-6961,814	-6961,800	-6350,262
G07	24,306	24,3125	24,307	25,0846	24,642
G08	0,0958250	0,0958250	0,095825	0,0958141	0,095825
G09	680,630	680,6305	680,630	680,7455	680,763
G10	7049,33	7049,401	7054,316	7050,805	8835,655
G11	0,75	0,7501	0,75	0,760	0,75

Tabela 4.6 Uporedni prikaz dobijenih rezultata i rezultata koje su dobili Barbosa i Lemonge [Bar 02]

Test	Tačan	Najbolji		Prosečni		Najgori	
			[Bar 02]		[Bar 02]		[Bar 02]
G01	-15.0	-15.00	-15.00	-14.886	-15.00	-14.7006	-15.00
G02	0.803619	0.803615	0.7918570	0.79077	0.7514353	0.79023	0.6499022
G03	1.0	1.0007	1.000307	0.9977	0.9997680	0.9788	0.9983935
G04	-30655.54	-30665.536	-30665.51	-30665.520	-30665.29	-30665.50	-30664.91
G05	5126.4981	5126.505	5126.571	5130.954	5389.347	5139.818	6040.595
G06	-6961.814	-6961.810	-6961.796	-6961.805	-6961.796	-6961.800	-6961.796
G07	24.306	24.3125	24.85224	24.4127	27.90973	25.0846	33.07581
G08	0.0958250	0.0958250	0.0958250	0.095810	0.0942582	0.0958141	0.0795763
G09	680.630	680.6305	680.6678	680.621	680.9640	680.7455	681.6396
G10	7049.33	7049.401	7080.107	7050.141	8018.938	7050.805	9977.767
G11	0.75	0.7501	0.75	0.7588	0.75	0.760	0.75

4.6 Evaluacija metode optimizacije

Efektivnost optimizacionog algoritma označava njegovu sposobnost da pronađe kvalitetna rešenja, dok se pod efikasnošću podrazumeva se brzina u rešavanju problema. U slučaju jednoparametarske optimizacije rešenje je globalni ekstrem funkcije cilja, dok je za višekriterijumsku optimizaciju to kvalitetan Pareto front.

Kako se kod višekriterijumske optimizacije metod optimizacije ocenjuje kvalitetom dobijenog Pareto fronta, algoritam pretrage ima dva osnovna cilja. Prvi je egzaktnost, odnosno pronalaženje rešenja što bližih pravom Pareto frontu, a drugi je raznovrsnost rešenja. U literaturi se za procenu ovih dveju performansi algoritama za višekriterijumsku optimizaciju može naći čitav niz metrika [Deb 01, Tan 02, Zit 03], a u predmetnom istraživanju su zbog relativne jednostavnosti i ilustrativnog karaktera korištene metrike za ocenu generacijskog odstojanja i rasprostiranja rešenja [Deb 01].

Pod ocenom generacijskog odstojanja podrazumeva se ocena kvaliteta dobijenog Pareto fronta, odnosno odstojanja dobijenih rešenja od stvarnih Pareto optimalnih, dok se druga metrika koristi za ocenu opsega i raznovrsnosti rešenja u dobijenom Pareto frontu. U oba slučaja manja vrednost metrike označava bolju performansu algoritma.

Očigledno je da je za obe opisane metrike neophodno znati pravi Pareto front. Kako u realnim problemima iz prakse to nikada nije slučaj, kao pravi Pareto front koriste se sva nedominirana rešenja iz eksternih populacija dobijenih tokom svih devet puštanja programa u rad.

Ako se proizvoljni Pareto set i globalni Pareto set označe s Q i P^* , respektivno, tada se generacijsko odstojanje (GD) može izračunati kao [Deb 01]:

$$GD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N d_{ij}^2}}{N} \quad (4.12)$$

gde je N ukupan broj rešenja u Pareto setu Q , a d_{ij} je odstojanje i -tog rešenja Pareto seta Q od njemu najbližeg, j -tog rešenja Pareto seta P^* .

Kvalitet rasprostiranja rešenja (GS) može se definisati kao [Deb 01]:

$$GS = \frac{\sum_{m=1}^2 d_m^e + \sum_{i=1}^{N-1} |d_{ik} - d_{sr}|}{\sum_{m=1}^2 d_m^e + (N-1)d_{sr}} \quad (4.13)$$

gde je d_{ik} odstojanje između i -tog rešenja u Pareto setu Q i njemu najbližeg, k -tог rešenja, d_{sr} je prosečna vrednost d_{ik} , d_m^e je odstojanje između ekstremnih rešenja Pareto setova P^* i Q za funkciju cilja f_m .

U obe navedene jednačine vrednosti odstojanja d_{ij} i d_{ik} određuju se primenom jednačine (4.9), pri čemu su normalizovane minimalnim i maksimalnim vrednostima funkcija cilja u globalnom Pareto setu P^* . Pri tom treba imati u vidu da se d_{ik} računa sekvenčno za Pareto rešenja raspoređena po vrednosti funkcija cilja i da shodno tome k -to rešenje ne mora nužno biti najbliže i -tom.

Efikasnost optimizacionog algoritma meri se vremenom potrebnim za proračun. Kao dodatni kriterijum korišćen je i broj pokretanja programa za simulaciju zato što ovi programi odnose najviše vremena u procesu proračuna.

Na osnovu deset probnih puštanja programa u rad, za svi tri scenarija usvojeni su sledeći parametri genetskog algoritma: verovatnoća ukrštanja 0,9; verovatnoća mutacije 0,007; maksimalan broj generacija 300; veličina populacije 40; kapacitet eksterne populacije 30; maksimalan broj elitnih jedinki koje se iz eksterne populacije uvode u novu iznosi 10. Proračuni su sprovedeni u operativnom sistemu Windows 10 Pro 64 bit na računaru Intel Pentium G3260 3.3 GHz, 8 GB RAM.

5. Studija slučaja

5.1 Postavka eksperimenta

Kako je predmet istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji bio iznalaženje najpodesnjeg pristupa u opisivanju oblika i orijentacije objekta u optimizaciji, proračun je sproveden primenom tri različita scenarija:

- Scenario I – pristup dužina-ugao
- Scenario II – pristup dužina-nagib bez remapiranja
- Scenario III – pristup dužina-nagib s remapiranjem.

Pri tome je ideja bila da se poređenjem rezultata scenarija I i II dobiju podaci o uticaju epistaze, a da se poređenjem rezultata scenarija II i III utvrdi uticaj kodnog izomorfizma. Stoga je program puštan u rad po tri puta za svaki scenario (ukupno devet puta). Kako bi se zarad verodostojnosti poređenja eliminisao uticaj kvaliteta polazne populacije na konačan ishod proračuna, u scenarijima II i III korišćena je ista početna populacija, dok kod scenarija I to nije učinjeno jer se u njemu koriste druge promenljive.

Za sva tri scenarija razmatrane su efikasnost i efektivnost višekriterijumskog genetskog algoritma. Efektivnost optimizacionog algoritma označava njegovu sposobnost da pronađe kvalitetna rešenja. U slučaju jednoparametarske optimizacije to je globalni ekstrem funkcije cilja, dok je za višekriterijumsку optimizaciju to kvalitetan Pareto front. Pod efikasnošću algoritma podrazumeva se njegova brzina u rešavanju problema.

U cilju utvrđivanja prednosti i nedostataka opisanih pristupa u opisivanju oblika i orijentacije osnove objekta, sproveden je proračun za potrebe usvajanja idejnog rešenja poslovne zgrade u Beogradu. Zgrada ima tri etaže (prizemlje i dva sprata), petougaonu osnovu zadate površine $1.000,0 \text{ m}^2$ i spratnu visinu 3,5 m. Za potrebe programa za simulaciju energetskih performansi usvojeno je da

je grejna sezona od oktobra do marta a da se objekat rashlađuje od juna do septembra, tako da dnevna temperatura unutar objekta iznosi 22°C preko cele godine. Razmatrao se životni vek zgrade od 35 godina.

Razmatrana su tri scenarija, odnosno tri varijante opisa osnove objekta, a to su pristup dužina-ugao, pristup dužina-nagib bez remapiranja i pristup dužina-nagib s remapiranjem. Shodno tome, geometrija osnove definisana je dužinama stranica a_1 , a_2 i a_3 , i odgovarajućim setom uglova, tj. uglom (α) i temenim uglovima θ_1 , θ_2 , θ_3 za pristup dužina-ugao, odnosno uglovima nagiba α_1 do α_4 za pristup dužina-nagib, a preostale geometrijske veličine generišu se automatski tako da se dobije zahtevana površina osnove. Ostale promenljive su iste u sve tri razmatrane alternative.

Usvojeno je ograničenje da dužine svih stranica poligona a_i moraju biti u intervalu od 5,0 do 200,0 m, da temeni uglovi θ_i moraju biti u intervalu od 15 do 345° , dok za ugao α i uglove nagiba α_i nema ograničenja, tj. mogu iznositi od 0 do 360° . Iako se može usvojiti da promenljive za opisivanje oblika moraju diskretne, u predmetnom istraživanju je u cilju temeljnosti pretrage usvojeno da su kontinualne.

Na raspolaganju je šest tipova prozora (W_i), a to su prozori s dvostrukim oknima bez ikakvog premaza (W_1), s refleksionim premazom na spoljašnjem staklu (W_2), s niskoemisionim premazom $e = 0,2$ ili $e = 0,1$ na spoljašnjoj strani unutrašnjeg okna (W_3 i W_4 , respektivno) i s niskoemisionim premazom $e = 0,2$ ili $e = 0,1$ na unutrašnjoj strani spoljašnjeg okna (W_5 i W_6 , respektivno).

Veličina prozora za svaku fasadu definisana je koeficijentom zastakljenosti, odnosno odnosom površine prozora i zida, koji ima vrednosti od 0,2 do 0,8 i razmatra se za svaki zid zasebno.

Za nadstrešnicu postoje dve osnovne alternative (sa i bez), pri čemu dubina nadstrešnice iznosi između 0,1 i 1,2 m, a visina je konstantna i iznosi 0,2 m.

Razmatrana su dva tipa noseće konstrukcije (promenljiva TK), a to su čelični i betonski skelet. U oba slučaja su ploča prizemlja, međuspratne konstrukcije i krovna ploča armiranobetonske livenе na licu mesta.

Fasadni zidovi sastoje se od sledećih slojeva: fasadna opeka, zazor (20 mm), čvrsta izolacija (promenljiva WI), parna brana (polietilen debljine 6 mm), giter blok i gips-kartonska ploča debljine 12 mm. Za izolaciju zidova, međuspratnih konstrukcija i krova razmatrano je šest tipova izolacije, a to su ekspandirani i ekstrudirani polistiren (EPS i XPS) debljine 76 mm, 102 mm i 127 mm, respektivno. Prikaz svih razmatranih promenljivih, njihovih tipova i opsega vrednosti dat je u tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Podaci o promenljivama

Promenljiva		Tip	Raspon ili vrednosti
$a_i, i = 1, \dots, 3$	Dužina stranice	Kontinualna	[5,0; 200,0]
α_i	Orijentacija prve stranice	Kontinualna	[0; 360,0]
$\theta_i, i = 1, \dots, 3$	Temeni ugao	Kontinualna	[15,0; 345,0]
$\alpha_i, i = 1, \dots, 4$	Nagibi stranica	Kontinualna	[0; 360,0]
TK	Noseća konstrukcija	Diskretna	(1, 2)
W	Tip prozora	Diskretna	(1, 2, 3, 4, 5)
$WW_i, i = 1, \dots, 5$	Koeficijent zastakljenosti	Kontinualna	[0,2; 0,8]
$WI_i, i = 1, \dots, 5$	Zidna izolacija	Diskretna	(1, 2, 3, 4, 5, 6)
$RI_i, i = 1, \dots, 5$	Krovna izolacija	Diskretna	(1, 2, 3, 4, 5, 6)

5.2 Rezultati i diskusija

Performanse ispitivane tri varijante optimizacionog algoritma ocenjivane su metrikama opisanim u poglavlju 4.6, dok je za ocenu efikasnosti korišćeno je i vreme potrebno za proračun (CPU), a u ovom slučaju je kao dodatni kriterijum korišćen i broj pokretanja programa za simulaciju, budući da se ovi programi aktiviraju pri razmatranju svake jedinke a iziskuju više vremena od bilo koje fruge operacije. Stoga je važno da se geometrija objekta definiše što jednostavnije kako ne bi došlo do nepotrebnog opterećenja programa redundantnim rešenjima ili zaglavljivanja algoritma u lokalnim optimumima.

Svaki program je puštan tri puta u rad, a rezultati metrika GD i GS, CPU vremena i broj pokretanja simulacija prikazani su u Tabeli 5.2.

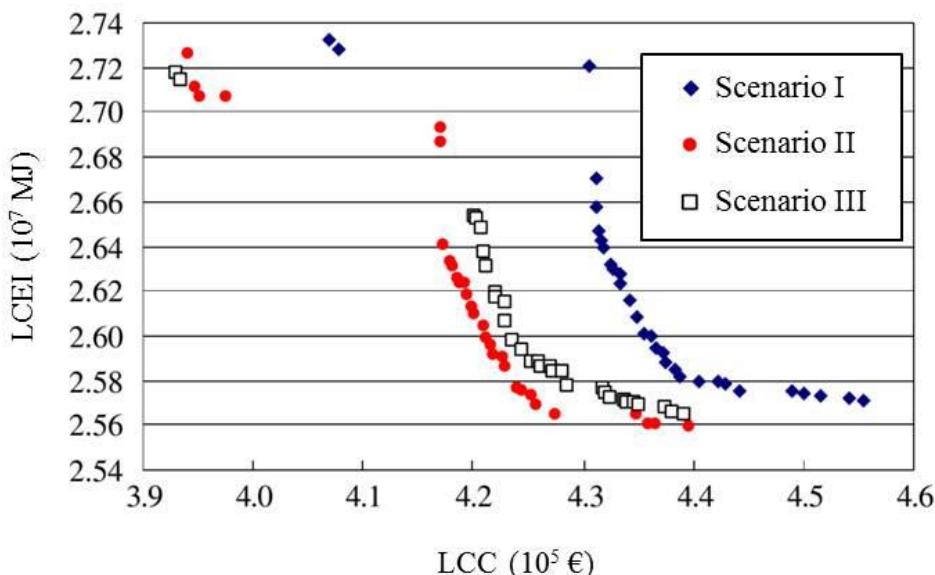
Tabela 5.2 Uporedni prikaz vrednosti metrika

Scenario	Ciklus	GD	GS	CPU [h]	Broj simulacija
I	I-1	0,027	0,69	36,6	9.396
	I-2	0,024	0,71	38,7	9.318
	I-3	0,036	0,72	35,8	9.006
II	II-1	0,009	0,47	29,4	7.850
	II-2	0,008	0,51	29,9	7.994
	II-3	0,002	0,52	29,2	7.792
III	III-1	0,008	0,54	29,0	8.055
	III-2	0,008	0,51	28,5	8.120
	III-3	0,009	0,52	30,1	7.902

5.2.1 Analiza efektivnosti

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 5.2, može se uočiti su vrednosti metrike GD upadljivo nepovoljnije (veće) za scenario I, dok su za scenarije II i III približno iste veličine, pri čemu scenario III pokazuje veću konzistentnost (ujednačenost) rezultata ali se apsolutno najmanja vrednost vrednost metrike GD (0,002) dobila za scenario II, što je dovelo i do smanjenja prosečne vrednosti GD . Izrazita razlika ovde vrednosti GD u odnosu na ostale navodi na zaključak da je preporučljivo više puta ponoviti proračun, pošto nema garancije da će se jednim puštanjem programa u rad zaista dobiti najbolji mogući Pareto set. Značajna razlika u vrednosti GD za scenario I u odnosu na druga dva pokazuje da visok nivo epistaze bitno utiče na konvergenciju algoritma. S druge strane, relativno bliske vrednosti GD dobijene za scenarije II i III znače da kodni izomorfizam nema bitan uticaj na konvergenciju u ovom tipu problema.

Da bi se jasnije ilustrovala razlika između rešenja s različitim vrednostima GD , na Slici 5.1 prikazani su Pareto frontovi dobijeni trećim puštanjem programa u rad za sva tri scenarija (I-3, II-3 i III-3). Može se uočiti da su Pareto frontovi međusobno udaljeniji što je veća razlika vrednosti metrike GD .



Slika 5.1 Pareto frontovi za scenarije I-3, II-3 i III-3

Što se tiče vrednosti metrike GS, njena manja vrednost ukazuje na bolji kvalitet Pareto fronta, odnosno na ravnomerniju raspodelu rešenja. I u ovom slučaju je scenario II dao najbolja rešenja a scenario I najgora. Iz definicije metrike GS je očigledno da njena vrednost metrike zavisi od dva faktora, a to su raspon i ravnomernost raspodele duž Pareto fronta, određenima vrednostima d^e_m i $(d_i - d_{Sr})$, respektivno.

Kako je za sva tri scenarija primenjena tehnika klastera u cilju sprečavanja nagomilavajna rešenja u okolini lokalnih optimuma, čime se automatski postiže ravnomernost raspodele rešenje duž Pareto fronta, jasno je da ovaj faktor nema bitnog uticaja na vrednost metrike GS, te da su stoga različite vrednosti pretežno posledica različitih raspona dobijenih Pareto frontova, odnosno razlike između njihovih ekstremnih rešenja. Visoke vrednosti metrike GS za scenario I ukazuju na to da su njegova ekstremna rešenja najudaljenija od globalnog Pareto fronta, što je za posledicu imali visoku vrednost d^e_m . I u ovom slučaju su rezultati za scenario II neznatno bolji nego za scenario III.

5.2.2 Analiza efikasnosti

Efikasnost razmatranih programa ocenjivana je na osnovu vremena potrebnog za proračun (*CPU*) i broja aktiviranja simulacionih programa. Scenario I je iziskivao upadljivo više vremena i aktiviranja simulacija tokom razmatranih 300 generacija, dok su druga dva scenarija i u ovom slučaju imala približno iste rezultate.

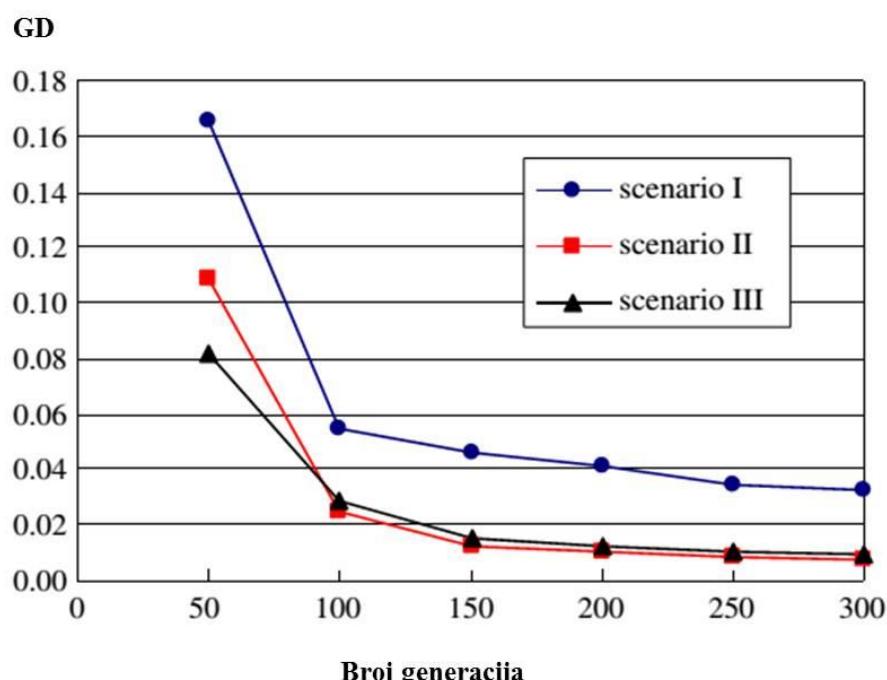
U sva tri scenarija prosečno CPU vreme po simulaciji iznosi 24 sekunde, što pokazuje da simulacije odnose najveći deo ukupnog CPU vremena, dok se vreme neophodno za dodatne operacije kao što je remapiranje može smatrati zanemarljivim.

Činjenica da je broj pozivanja programa za simulaciju bio za oko 10% manji kod scenarija II i III može se objasniti time što se pristupom dužina-nagib dobija više nemogućih i redundantnih rešenja nego pristupom dužina-ugao.

Na osnovu podrobne analize izlaznih datoteka za svaku dvadesetu generaciju, uočeno je da se scenarije II i III generiše u proseku po četiri nemoguća rešenja po generaciji, što je približno 10% u odnosu na veličinu populacije, dok se za scenario I tokom čitave evolucije pojavilo svega nekoliko nemogućih rešenja. Kako se za nemoguća rešenja ne aktivira program za simulaciju, razumljivo je što su za scenarije II i III dobijena manja proračunska vremena i broj simulacija. Takođe se može uočiti i da je poređenje svake generacije s prethodnom kako se za ponovljene jedinke ne bi pokretao program simulaciju dalo pozitivan rezultat. Primera radi, za scenario I je broj pokretanja programa za simulaciju za oko 15 % manji od ukupnog broja razmatranih jedinki, odnosno proizvoda maksimalnog broja generacija (300) i broja jedinki u populaciji (40). Kako scenario I daje vrlo malo nemogućih rešenja, može se smatrati da je smanjenje broja poziva programa za simulaciju uglavnom posledica pomenute kontrole.

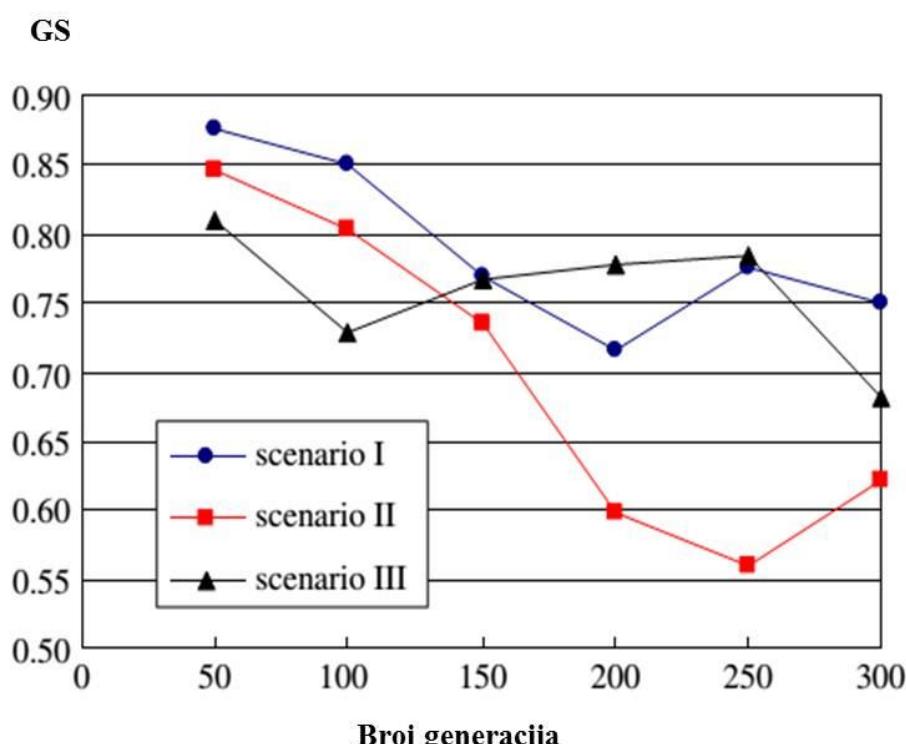
U prethodnoj analizi razmatrale su se samo vrednosti metrika GD i GS za konačna Pareto rešenja. Međutim, praćenje promena vrednosti ovih metrika tokom evolucije takođe je dalo indikativne rezultate. Vrednosti metrika su računate na svakih pedeset generacija poređenjem sa istim Pareto setom kao i pre, a prosečni rezultati iz tri proračuna dati su na slikama 5.2 i 5.3, pri čemu treba napomenuti da vrednosti metrika nisu računate za polaznu generaciju jer se ona formira nasumično i stoga ima vrlo malo elitnih jedinki, tako da u tom slučaju vrednosti razmatranih metrika ne govore ništa o performansama algoritma pretrage.

Na slici 5.2 može se uočiti da vrednost metrike GD opada tokom evolucije i to rapidno u početku a kasnije sve sporije. Vrednost GD ostaje sve vreme upadljivo viša za scenario I u odnosu na druga dva scenarija, čije vrednosti nakon stote generacije ostaju veoma bliske. Veoma je indikativno to što se scenarija II i III već u stotoj generaciji dostiže vrednost GD koja je manja od konačne vrednosti metrike za prvi scenario nakon celokupne evolucije. Sve ovo navodi na zaključak da se pristupom dužina-nagib obezbeđuje značajno brža konvergencija.



Slika 5.2 Promena metrike GD kroz 300 generacija

Takođe se može uočiti da je za sva tri scenarija konvergencija ka globalnom Pareto frontu mnogo brža u prvoj polovini evolucije, što je saglasno činjenici da su genetski algoritmi veoma delotvorni u globlanoj pretrazi, tj. pronalaženju obećavajućih zona, ali da nisu toliko dobri za finiju pretragu u okolini lokalnih ekstremi.

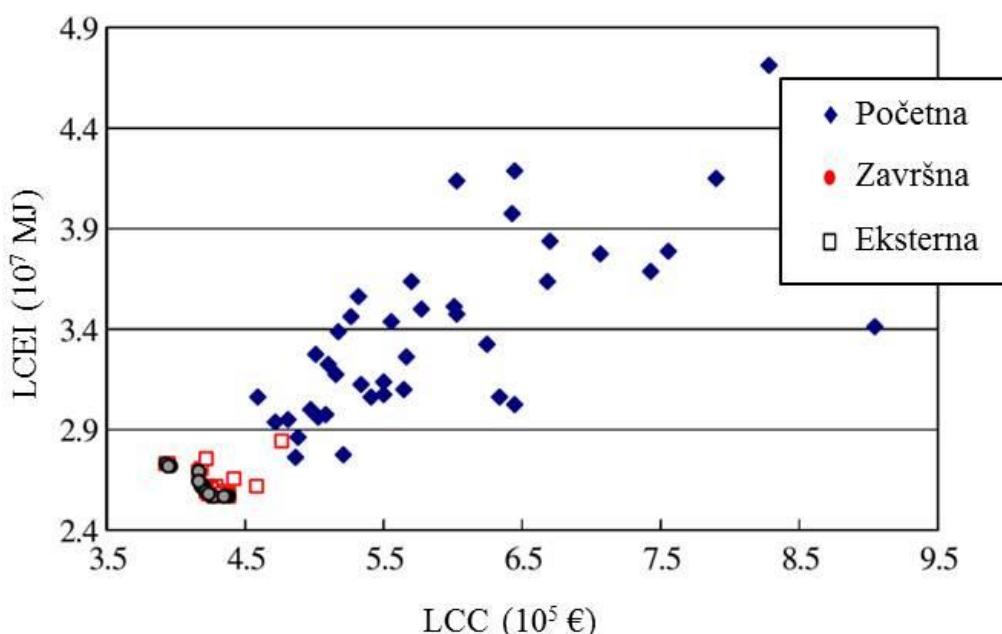


Slika 5.3 Promena metrike GS kroz 300 generacija

Za razliku od metrike GD , vrednosti metrike GS ne menjaju se monotono tokom evolucije (slika 5.3), niti dostižu ekstremne vrednosti u razmatranim generacijama, što se može objasniti prirodom elitističkog pristupa. Naime, kako nedominirana rešenja imaju prioritet, može se dogoditi da vrednost metrike GS poraste kad god se dominantno Pareto rešenje iz nove generacije poredi s nedominantnim ali objektivno podobnjim rešenjem iz prethodne.

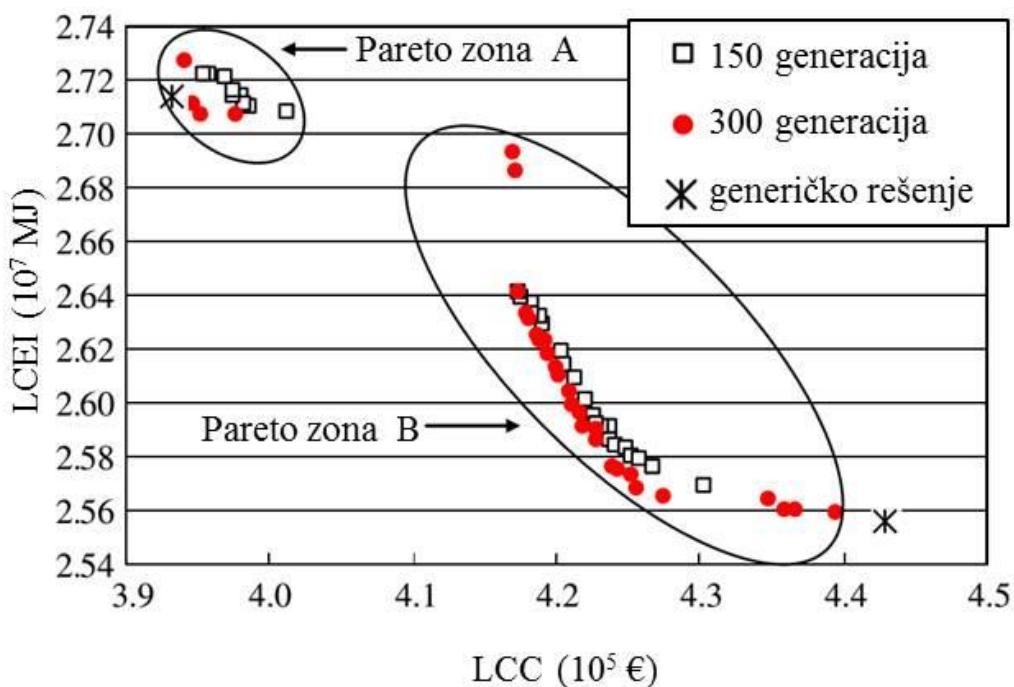
Kako je najniža vrednost metrike GD dobijena u trećoj iteraciji scenarija II (II-3), što znači da je taj Pareto front najbliži globalnom, u daljoj analizi razmatraće se samo ti rezultati.

Na slici 5.4 prikazane su polazna i završna populacija za II-3, kao i eksterna populacija. Može se uočiti da je polazna populacija veoma raštrkana, dok je većina jedinki završne mahom skoncentrisana u donjem levom uglu, veoma blizu eksternoj populaciji, iz čega se može zaključiti da je postignuta dobra konvergencija. Takođe je evidentna uloga optimizacije, pošto za svako rešenje iz polazne populacije postoji dominantno rešenje iz eksterne.



Slika 5.4 Raspodela početne, završne i eksterne populacije za treću iteraciju scenarija II

Na osnovu slike 5.5, na kojoj su prikazani Pareto frontovi scenarija II-3 nakon sto pedesete i tristote generacije, kao i dva generički konstruisana rešenja dobijena aproksimacijom najboljih rešenja po jednom i drugom kriterijumu, može se zaključiti da Pareto front dobijen posle sto pedeset generacija vrlo dobro aproksimira konačni Pareto front.



Slika 5.5 Pareto frontovi scenarija III nakon 150 i 300 generacija i dva generički konstruisana rešenja

5.2.3 Kvalitativna analiza rezultata

Na uvećanom prikazu Pareto fronta (Slika 4.5) vidi se da donosilac odluke na ovaj način može steći jasan uvid u mogućnosti koje ima na raspolaganju menjanjem određenih svojstava objekta i na taj način postići zadovoljavajući kompromis između ekoloških i ekonomskih aspekata u okviru datih ograničenja i okolnosti.

U pogledu vrednosti funkcije LCC, na Pareto frontu se vide dve jasno odvojene zone, označene kao A i B. Rešenja u zoni A imaju nižu cenu ali veći uticaj na okolinu, dok su rešenja u zoni B skuplja ili podesnija u ekološkom smislu. Pregled rešenja u Pareto frontu dobijenom u iteraciji II-3 dat je u Tabeli 4.3, gde se mogu videti i vrednosti svih promenljivih. Rešenja su raspoređena po rastućoj vrednosti funkcije koštanja objekta tokom celog životnog ciklusa (LCC), kao primarnog kriterijuma u donošenju odluke.

Na osnovu vrednosti uglova nagiba stranica poligona može se uočiti da je u svim rešenjima prikazanog Pareto fronta fasadni zid a_1 okrenut je ka jugu, zid a_2 pretežno ka zapadu, zidovi a_3 i a_4 pretežno ka severu, a zid a_5 pretežno ka istoku. Vrednost nagiba zida a_1 vrlo malo varira i kreće se od 81° do 90° , pri čemu u velikoj većini rešenja iznosi 84° , dok dužina tog zida u većini rešenja iznosi 33,3 m, a tek u poslednjoj trećini Pareto fronta počinje postepeno da raste do vrednosti 52,4 m.

Južni zid (a_1) je u svim rešenjima najduži, što govori o tendenciji da se maksimalno iskoristi prirodna sunčeva svetlost za grejanje i osvetljenje. Takođe se može uočiti i da je prva polovina rešenja kompaktnog oblika bliskog pravilnom petouglu, a da zatim osnove počinju da se izdužuju u pravcu istok-zapad, odnosno tako da se dobije maksimalna izloženost južne fasade suncu. Treba istaći da ni u jednom rešenju nijedan zid nije direktno okrenut ka severu, nego da su na severnoj strani objekta uvek zidovi a_3 i a_4 , okrenuti ka severozapadu i severoistoku, respektivno.

Tabela 5.3-a Pregled rešenja u Pareto frontu II-3

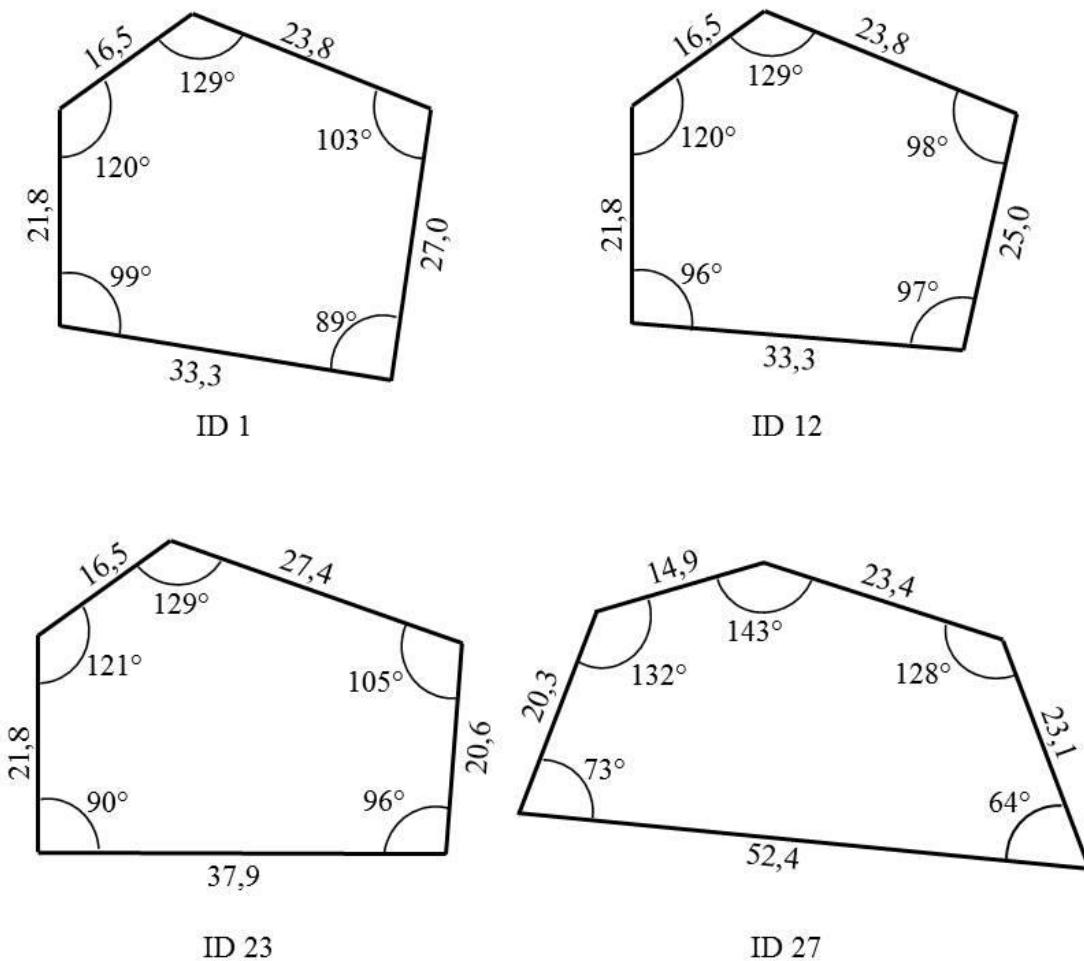
ID	a_1	a_2	a_3	a_4	a_1	a_2	a_3	LCC (10^5 €)	LCEI (10^7 MJ)	Zona
1	-81	0	60	111	33,3	21,8	16,5	3,947	2,711	A
2	-81	0	60	111	33,3	21,8	16,5	3,952	2,707	
3	-84	0	57	108	33,3	21,8	13,4	3,977	2,705	
4	-84	0	60	105	32,5	21,8	16,5	4,170	2,693	
5	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,172	2,686	
6	-84	0	57	111	33,3	21,8	16,5	4,174	2,641	
7	-84	0	57	111	33,3	21,8	16,5	4,180	2,633	
8	-84	0	57	111	32,5	21,8	16,5	4,181	2,631	
9	-84	0	57	111	32,5	21,8	16,5	4,186	2,625	
10	-84	0	57	111	32,5	21,8	16,5	4,188	2,623	
11	-84	0	57	111	33,3	21,8	16,5	4,194	2,618	B
12	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,199	2,613	
13	-84	0	57	111	32,5	21,8	16,5	4,201	2,610	
14	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,210	2,604	
15	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,211	2,599	
16	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,216	2,596	
17	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,218	2,591	
18	-84	0	65	111	33,3	21,8	16,5	4,228	2,590	
19	-84	0	60	111	33,3	21,8	16,5	4,229	2,586	
20	-84	0	60	111	34,8	21,8	16,5	4,240	2,576	
21	-84	0	60	111	34,8	21,8	14,9	4,244	2,575	
22	-90	0	60	111	34,8	21,8	16,5	4,253	2,573	
23	-90	0	60	111	37,9	21,8	16,5	4,257	2,568	
24	-90	0	60	105	40,9	21,8	14,9	4,275	2,565	
25	-84	23	71	108	49,4	20,3	14,9	4,359	2,562	
26	-84	23	71	108	49,4	20,3	14,9	4,366	2,560	
27	-84	23	71	108	52,4	20,3	14,9	4,396	2,559	

Tabela 5.3-b Pregled rešenja u Pareto frontu II-3

ID	TK	W	WW ₁	WI	N ₁	ND ₁	LCC (10 ⁵ €)	LCEI (10 ⁷ MJ)	Zona
1	ČK	W ₅	0,20	I ₆	Ne	/	3,947	2,711	A
2	ČK	W ₅	0,20	I ₆	Da	0,10	3,952	2,707	
3	ČK	W ₅	0,24	I ₆	Da	0,17	3,977	2,705	
4	BK	W ₁	0,22	I ₃	Ne	/	4,170	2,693	B
5	BK	W ₁	0,26	I ₃	Ne	/	4,172	2,686	
6	BK	W ₅	0,25	I ₃	Ne	/	4,174	2,641	
7	BK	W ₅	0,31	I ₃	Ne	/	4,180	2,633	
8	BK	W ₅	0,33	I ₃	Ne	/	4,181	2,631	
9	BK	W ₅	0,34	I ₃	Da	0,10	4,186	2,625	
10	BK	W ₅	0,41	I ₃	Ne	/	4,188	2,623	
11	BK	W ₅	0,41	I ₃	Da	0,10	4,194	2,618	
12	BK	W ₅	0,50	I ₃	Ne	/	4,199	2,613	
13	BK	W ₅	0,50	I ₃	Da	0,10	4,201	2,610	
14	BK	W ₅	0,54	I ₃	Da	0,10	4,210	2,604	
15	BK	W ₃	0,62	I ₃	Ne	/	4,211	2,599	
16	BK	W ₃	0,61	I ₃	Da	0,10	4,216	2,596	
17	BK	W ₃	0,65	I ₃	Da	0,10	4,218	2,591	
18	BK	W ₃	0,65	I ₃	Da	0,10	4,228	2,590	
19	BK	W ₅	0,73	I ₃	Da	0,10	4,229	2,586	
20	BK	W ₃	0,80	I ₃	Da	0,10	4,240	2,576	
21	BK	W ₃	0,80	I ₃	Da	0,10	4,244	2,575	
22	BK	W ₃	0,80	I ₃	Da	0,10	4,253	2,573	
23	BK	W ₃	0,80	I ₃	Da	0,10	4,257	2,568	
24	BK	W ₃	0,80	I ₃	Da	0,10	4,275	2,565	
25	BK	W ₅	0,80	I ₃	Da	0,17	4,359	2,562	
26	BK	W ₅	0,80	I ₃	Da	0,25	4,366	2,560	
27	BK	W ₅	0,80	I ₃	Da	0,25	4,396	2,559	

Zid a_2 je u velikoj većini rešenja (prvih dvadeset) okrenut direktno ka zapadu, a blago se iskošava tek u poslednja tri rešenja, što je posledica upadljivog izduživanja osnove u pravcu istok-zapad, kako bi se koliko-toliko smanjili efekta izloženosti južnog zida suncu tokom letnjih poslepodneva. Dužina ovog zida ostaje 21,8 m duž celog Pareto fronta i malo se menja tek za poslednja tri rešenja, padajući na 20,3 m. Nagibi zidova a_3 i a_4 vrlo malo variraju jer izloženost suncu nema bitan uticaj na severne fasade. Dužina zida a_3 iznosi 16,5 m u većini rešenja, a dužine zidova a_4 i a_5 menjaju se tako da isprate izduženje objekta, odnosno da se zadrži zadata površina osnove.

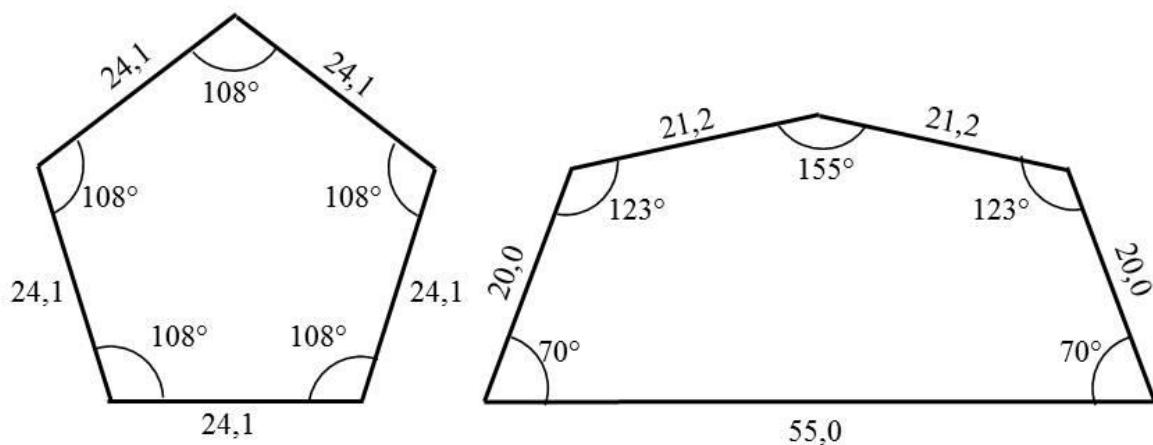
Na Slici 5.6 prikazana je geometrija četiri karakteristična rešenja na kojima se jasno vide opisane promene dužina i nagiba stranica poligona.



Slika 5.6 Karakteristična rešenja iz Pareto fronta II-3

Kako predmetni objekat ima fiksiranu površinu osnove i spratnu visinu, može se smatrati da je obim osnove dobar pokazatelj kompaktnosti oblika. Obim osnove se menja od 122,0 m za prvo rešenje, do 134,0 m za poslednje, pri čemu za približno dve trećine rešenja ostaje manje-više konstantan i iznosi oko 122,5 m. Primetno je, što je i logično, da porast obima prati rast cene.

Budući da se u prikazanim rešenjima može uočiti opšta tendencija da cena raste a utrošak energije opada s porastom obima i dužine južne fasade, nezavisno su konstruisana još dva generička geometrijski pravilna, simetrična rešenja (Slika 5.7), budući da se u praksi zbog urbanističkih i estetskih uslova uglavnom teži pravilnim oblicima osnova.



Slika 5.7 Generički konstruisana rešenja

Od svih petouglova zadate površine, u ovom slučaju 1.000,0 m², najmanji obim će imati pravilan, jednakostranični petougao, čiji obim iznosi 120,5 m, što je upravo vrednost koja dominira u rešenjima u Pareto frontu. Stoga je prvoj razmatranoj osnovi zgrade na Slici 5.7 dodeljen upravo taj oblik, dok su vrednosti ostalih promenljivih u proračunu iste kao u prvom rešenju u tabeli 4.3. Za takve ulazne podatke dobija se da vrednosti funkcija cilja iznose LCC = $3,932 \cdot 10^5$ € i LCEI = $2,714 \cdot 10^7$ MJ, što nije dominantno rešenje ali prošruje Pareto front ka minimalnoj ceni.

Druga razmatrana osnova na Slici 5.7, izrazito izdužena i izložena jugu, konstruisana je na osnovu poslednjeg rešenja u Pareto frontu, iz koga su preuzete vrednosti ostalih promenljivih. Za ovaj slučaj dobijaju se vrednosti funkcija cilja $LCC = 4,429 \cdot 10^5$ € i $LCEI = 2,556 \cdot 10^7$ MJ, što, kao i u prethodnom slučaju nije dominantno rešenje, ali pomera Pareto front ka minimalnoj vrednosti potrošnje energije. Dobijeni rezultati pokazuju da je genetski algoritam uspešno konvergirao ka stvarnom globalnom Pareto frontu, ali da je bilo problema u lociranju ekstremnih vrednosti, što je saglasno rezultatima drugih istraživanja [Zit 03].

Dve izrazito odvojene zone dobijenog Pareto fronta korespondiraju s razmatranim tipovima konstrukcije i ukazuju na to da se čelična noseća konstrukcija jeftinija ali da ima veći uticaj na okolinu u odnosu na betonsku, što je saglasno rezultatima drugih sličnih istraživanja.

Što se tiče prozora, pokazalo se da su, osim u dva slučaja (rešenja 3 i 4), optimalno rešenje prozori s dvostrukim oknima i niskoemisionim premazom (tipovi W_3 i W_5), pri čemu se neznatno bolja rešenja dobijaju za prozore s premazom na spoljašnjem oknu (W_3). Primera radi, ukoliko se u rešenju br. 12 prozori W_5 zamene prozorima W_3 , vrednosti funkcija cilja menjaju se sa $4,199 \cdot 10^5$ na $4,198 \cdot 10^5$ € za LCC i sa $2,613 \cdot 10^7$ na $2,611 \cdot 10^7$ (MJ) za LCEI.

Ovako male promene vrednosti funkcija cilja predstavljaju genetskom algoritmu poteškoću u pronalaženju pravog lokalnog optimuma u složenom kombinatornom problemu s mnogo promenljivih kao što je ovaj, što se može prevazići hibridizacijom genetskog algoritma s nekom drugom metaheuristikom podesnjom za lokalnu pretragu, kao što je tabu metoda.

Veličina prozora, odnosno odnos površine prozora i zida, varira jedino za južnu fasadu, dok za sve ostale ostaje nepromenljiv i iznosi 0,2.

Nadstrešnica iznad prozora pojavljuje se na većini rešenja samo na južnom zidu, dok je na ostalim zidovima nema, i njena dubina uglavnom je jednaka minimalnoj ponuđenoj vrednosti od 0,1 m, dok se veće vrednosti dobijaju samo u poslednjim rešenjima u zonama A i B. Najveća nadstrešnica

(0,25 m) dobija se za poslednja dva rešenja, koja se odlikuju najvećom površinom južnog zida i najvećom površinom prozora. Dobijeni rezultati su smisleni, pošto na severno orijentisanim zidovima direktnog uticaja sunca, dok na zidovima okrenutim ka istoku i zapadu ono pada pod uglom.

Izolacija u zidovima zavisi jedino od konstruktivnog sistema, tako da je u celoj zoni A (čelična konstrukcija) izolacija XPS od 76 mm, a u celoj zoni B (betonska konstrukcija) izolacija EPS od 76 mm.

5.3 Zaključna razmatranja

Na osnovu izloženih rezultata i njihovih tumačenja, može se zaključiti da je prikazana metodologija podesna za primenu u fazi izrade idejnog rešenja zgrade jer daje jasan uvid u uticaj razmatranih parametara na ekonomske i ekološke performanse zgrade. Shodno tome, u sledećoj fazi donošenja odluke mogu se usvojiti kao konstante parametri koji imaju stalne ili malo promenljive vrednosti i time se eliminisati iz daljeg razmatranja, što za posledicu ima smanjenje broja promenljivih u matematičkom modelu, čime se smanjuje opterećenje genetskog algoritma, odnosno ubrzava se konvergencija i dobijaju se kvalitetnija rešenja.

U projektantskom smislu, najvažnije informacije jesu one koje se tiču oblika i orijentacije objekta, i tipa noseće konstrukcije. Osnove kompaktnijeg oblika, koje se približavaju pravilnom mnogouglu, odnosno kvadratu ili krugu, daju nižu cenu (shodno manjem obimu) ali su nepovoljnije u pogledu energetske efikasnosti, dok objekti s osnovama izduženim u pravcu istok-zapad (odnosno s dominantnim južnim i severnim zidovima) rezultiraju višom cenom ali su pogodniji s tačke gledišta energetske efikasnosti. Čelična noseća konstrukcija ima nižu cenu od betonske ali je nepovoljnija u ekološkom smislu. Pri ovome treba imati u vidu da se ne misli samo na cenu materijala, nego i na sve troškove u fazi izgradnje, eksploatacije i demontaže objekta.

U predmetnom slučaju, iz daljeg razmatranja mogu se eliminisati svi predloženi tipovi prozora osim W_3 i W_5 . Kako ova dva tipa prozora daju približno iste rezultate, konačna odluka se donosi na osnovu trenutne dostupnosti na tržištu i preferenci investitora i projektanta. Nakon donošenja odluke, tip prozora postaje konstanta. Slično je i s veličinom prozora i nadstrešnice, jer je očigledno da se za sve zidove osim južnog može usvojiti da odnos površine prozora i zida iznosi 0,2 i da nema nadstrešnice, dok veličine prozora i nadstrešnice na južnom zidu ostaju promenljive, mada se, generalno gledano, s

dovoljnom tačnošću može usvojiti da je dubina nadstrešnice konstantna i da iznosi 0,1 m.

Izolacija u zidovima može se takođe eliminisati iz proračuna, jer je očigledno da izbor direktno zavisi od materijala noseće konstrukcije, tako da se za čeličnu noseću konstrukciju usvaja ekstrudirani poliester debljine 76 mm, a za betonsku ekstrudirani poliester iste debljine.

Na ovaj način donosilac odluke dobija dovoljno podataka o najpodesnjem izboru elemenata objekta za date ulazne podatke, tako da se u sledećem koraku razmatraju samo geometrijske karakteristike osnove i veličina prozora na južnom zidu.

Što se tiče uspešnosti genetskog algoritma u nalaženju globalnog Pareto fronta, može se zaključiti da je ova metoda pretrage podesna za nalaženje preliminarnih rešenja, odnosno za globalnu pretragu, dok je za finiju pretragu i lociranje stvarnih lokalnih optimuma preporučljivo koristiti neku precizniju metodu.

6. Zaključak

6.1 Zadaci i ostvareni rezultati

Prikazano istraživanje je pokazalo da se podesno odabranom metodom opisivanja geometrije objekta i primenom višekriterijumske optimizacije u cilju određivanja optimalne geometrije i pozicije objekta u prostoru mogu prevazići nedostaci tradicionalnog pristupa u vidu isprobavanja i poređenja različitih idejnih rešenja zasnovanih na iskustvu ili intuiciji projektanta. Adekvatan izbor metodologije prikazivanja i definisanja oblika i geometrijskih karakteristika objekta može bitno uticati na efektivnost i efikasnost optimizacionog algoritma, a samim tim i na svojstva objekta u pogledu energetske efikasnosti.

U disertaciji je prikazana metodologija za opisivanje geometrijskih karakteristika pri oblikovanju i pozicioniranju poligonalnog objekta u prostoru u cilju unapređenja njegovih energetskih i ekoloških performansi tokom čitavog trajanja eksploatacije, s posebnim osvrtom na pristupe dužina-ugao i dužina nagib i njihov uticaj na efektivnost i efektivnost procesa višekriterijumske optimizacije primenom genetskog algoritma.

Ostvareni rezultati pokazuju da se prikazana metodologija može uspešno implementirati u praksi budući da se donosiocu odluke ne nudi samo jedno, teorijski optimalno rešenje, nego čitav niz alternativa rangiranih u odnosu na cenu i energetsku efikasnost razmatranog objekta, tako da može odabrati ono rešenje koje će u datim okolnostima i ograničenjima (budžet, ekološki zahtevi, namena i funkcionalnost objekta) predstavljati kompromis između cene i performansi objekta.

6.2 Naučni i stručni doprinos disertacije

Na osnovu rezultata dobijenih u studiji slučaja, može se zaključiti sledeće:

- Oba razmatrana pristupa formulisana su tako da se mogu uspešno inkorporirati u program za simulaciju energetskih performansi datog objekta tokom čitavog perioda eksploatacije, čime se omogućava razmatranje i analiziranje objekata složenih oblika osnove.
- Pristup dužina-nagib daje bolje rezultate od pristupa dužina-ugao u pogledu najbitnijih performansi višekriterijumske genetske algoritma, a to su brzina konvergencije i ravnomernost dobijenog Pareto fronta.
- Visok nivo epistaze ima izrazito negativan uticaj na konvergenciju algoritma i zato treba izbegavati takve metode opisivanja geometrije objekta.
- Remapiranje stranica poligona kako bi se nizale u smeru kazaljke na satu počevši od prve nije pokazalo bitan uticaj na konvergenciju genetskog algoritma, što navodi na zaključak da kodni izomorfizam ne predstavlja značajan problem u razmatranoj metodi optimizacije.
- Oblik osnove objekta postepeno se menja duž Pareto fronta. Rešenja sa nižim troškovima izgradnje i eksploatacije objekta (LCC) imaju oblik pravilnog mnogougla, dok su rešenja sa nižim uticajem na okolinu (LCEI) izrazito izrazito izdužena u pravcu

istok-zapad kako bi se obezbedila maksimalna dužina i izloženost južne fasade.

- Prikazana metodologija može se uspešno implementirati za realne probleme optimalnog projektovanja energetski efikasnih objekata.
- Rezultati istraživanja objavljeni su na međunarodnom skupu [Mil 14] i u časopisu kategorije M51 [Bar 17].

6.3 Pravci i smernice za dalja istraživanja

Dalja istraživanja na ovom polju mogla bi ići u pravcu usložnjavanja oblika osnova i uvođenja krivolinijskih kontura u cilju razvoja metodologije koja bi davala zadovoljavajuće rezultate bez ograničenja u pogledu oblika i složenosti osnove objekta.

Kako se prikazani primer pokazao kao vrlo ilustrativan u pogledu ispitivanja performansi genetskog algoritma, može se koristiti kao test problem za ispitivanje složenijih varijanti ove metode višekriterijumske optimizacije, kao što su samoprilagođavajući i hibridni algoritmi. Takođe bi bilo preporučljivo isprobati hibridizaciju s nekom metodom lokalne pretrage kako bi se pospešilo pretraživanje zona u okolini lokalnih optimuma. Kako je ostvareno CPU vreme i dalje relativno dugo, moglo bi se isprobati tehnike metamodeliranja u cilju ubrzanja pretrage.

I kao najvažnije, dalji razvoj istraživanja u ovom polju treba da se kreće ka složenijim trodimenzionalnim modelima, odnosno višespratnim objektima.

7. Literatura

- [Ach 07] Achtziger, W. (2007). On simultaneous optimization of truss geometry and topology. *Struct. Multidisc. Optim.* 33, 285–304.
- [Ach 99a] Achtziger, W. (1999). Local stability of trusses in the context of topology optimization, Part I: Exact modelling. *Struct. Opt.* 17, 235–246.
- [Ach 99b] Achtziger, W. (1999). Local stability of trusses in the context of topology optimization, Part II: A numerical approach. *Struct. Opt.* 17, 247–258.
- [Ada 94] Adamu A, Karihaloo BL, Rozvany GIN. Minimum cost design of reinforced concrete beams using continuum-type optimality criteria. *Struct. Optim.*, 1994;7:91-102.
- [Ade 94] Adeli, H. (Ed.) (1994). *Advances in Design Optimization*. London: Chap-man & Hall.
- [Ant 89] Antonisse J., “A New Interpretation of Schema That Overturns the Binary Encoding Constraint”, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, pp. 86-91 (1989).
- [Aro 02] Arora, J. S. (2002). Methods for discrete variable structural optimization. In S. Burns (Ed.), *Recent Advancements in Optimal Structural Design*, pp. 1–40. Raton, VA: ASCE Press.

- [Aro 04] Arora, J. S. (2004). Introduction to Optimum Design (2nd ed.). New York: Academic Press.
- [Aro 07] Arora, J. S. (Ed.) (2007). Optimization of Structural and Mechanical Systems. Singapore: World Scientific.
- [Aro 15] Aronova, E.; Radovanović, Ž.; Murgul, V.; Vatin, N.; Shvarts, M. Energy-Efficient Modernization of the Nobel's Mansion in Saint Petersburg: Solar Energy Supply Potential (2015) *Applied Mechanics and Materials* 2015, 725-726, 1505–1511.
- [Asd 13] Asdrubali, F.; Buratti, C.; Cotana, F.; Baldinelli, G.; Goretti, M.; Moretti, E.; Baldassarri, C.; Belloni, E.; Bianchi, F.; Rotili, A.; et al. Evaluation of Green Buildings' Overall Performance through in Situ Monitoring and Simulations. *Energies* 2013, 6, 6525–6547.
- [ATH 03] ATHENA EIE Version 3.0. The ATHENA sustainable materials institute, Ottawa, Canada, 2003.
- [Bak 00] Baker, N.; Steemers, K. Energy and environment in architecture: a technical design guide, E&FN Spon, New York, 2000.
- [Bal 97] Balling RJ, Yao X. Optimization of reinforced concrete frames. *J. Struct. Eng.*, 1997;123(2):193-202.
- [Bar 02] Barbosa, H.J.C. and Lemonge, A.C.C., „An adaptive penalty scheme in genetic algorithms for constrained optimization problems“, in *Proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 287–294. Morgan Kaufmann Publishers, (2002).
- [Bar 03a] Barbosa, H.J.C., Lemonge, A.C.C., „A new adaptive penalty scheme for genetic algorithms“, *Inform Sci*;156:215–51 (2003).

- [Bar 03b] Barbosa, H. and Lemonge, A., „An Adaptive Penalty Scheme for Steady-State Genetic Algorithms“, GECCO'03 Proceedings of the 2003 international conference on Genetic and evolutionary computation, Partl, Pages 718-729, (2003).
- [Bar 17] Barović, D., Milajić A., Beljaković, D. Optimalno oblikovanje i pozicioniranje energetski efikasnih zgrada, Tehnika, 4/2017, 481–189.
- [Bea 88] Beasley J.E., "An algorithm for solving large capacitated warehouse location problems", European Journal of Operational Research 33, pp. 314-325 (1988).
- [Bea 93a] Beasley D., Bull D.R., Martin R.R., "An Overview of Genetic Algorithms, Part 1, Fundamentals", University Computing, Vol. 15, No. 2 (1993).
- [Bea 93b] Beasley D., Bull D.R., Martin R.R., "An Overview of Genetic Algorithms, Part 2, Research Topics", University Computing, Vol. 15, No. 4, pp. 170-181 (1993).
- [Bea 95] Beasley J.E., "Lagrangean Relaxation", In: Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Reeves C.R. (ed), McGraw-Hill, pp. 243-303 (1995).
- [Ben 03] Bendsøe, M. P. and O. Sigmund (2003). Topology Optimization: Theory, Methods and Applications. Berlin: Springer.
- [Ben 89] Bendsøe, M. P. (1989). Optimal shape design as a material distribution problem. Struct. Opt. 1, 193–202.
- [Ben 94] Bendsøe, M. P., A. Ben-Tal, and J. Zowe (1994). Optimization method for truss geometry and topology design. Struct. Opt. 7, 141–159.

- [Ble 10] Blengini, G.A.; Di Carlo, T.; Energy-saving policies and low-energy residential buildings: an LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy), *International Journal of Life Cycle Assessment* 2010, 15, 652–665.
- [Boj 98a] Bojczuk, D. and Z. Mróz (1998a). On optimal design of supports in beam and frame structures. *Struct. Opt.* 16, 47–57.
- [Boj 98b] Bojczuk, D. and Z. Mróz (1998b). Optimal design of trusses with account for topology variation. *Mech. Struct. & Mach.* 26 (1), 21–40.
- [Boj 99] Bojczuk, D. and Z. Mróz (1999). Optimal topology and configuration design of trusses with stress and buckling constraints. *Struct. Multidisc. Optim.* 17, 25–35.
- [Bou 00] Bouchlaghem, N. Optimizing the design of building envelopes for thermal performance, *Automation in Construction* 10 (1), pp. 101–112, 2000.
- [Bow 89] Bowler P., "The Mendelian Revolution: The Emergence of Hereditarian Concepts in Modern Science and Society", *BaltimoreGenetics: The life of DNA* Johns Hopkins University Press (1989).
- [Brm 91] Bramlette M.F., „Initialisation, Mutation and Selection Methods in Genetic Algorithms for Function Optimization“, Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 100-107 (1991).
- [Bur 02] Burns, S. (Ed.) (2002). Recent Advancements in Optimal Structural Design. Raton, VA: ASCE Press.

- [Bur 11] Buratti, C.; Moretti, E. Lighting and Energetic Characteristics of Transparent Insulating Materials: Experimental Data and Calculation. *Indoor Built Environ* 2011, 20, 400–411.
- [Buz 13] Buzuk, M. (2013). *Sustavi upravljanja okolišem*. Kemijsko-tehnološki fakultet. Zavod za kemiju okoliša. Split. str.19.
- [Bäc 00a] Bäck T., Fogel D. B., Michalewicz Z.: "Basic Algorithms and Operators", in: Evolutionary Computation 1, Institute of Physics Publishing, Bristol-Philadelphia, (2000).
- [Bäc 00b] Bäck T., Fogel D. B., Michalewicz Z.: "Advanced Algorithms and Operators", In: Evolutionary Computation 2, Institute of Physics Publishing, Bristol-Philadelphia, (2000).
- [Bäc 95] Bäck, T. and Schwefel, H.-P. (1995). Evolution Strategies I: Variants and their computational implementation. In Periaux and Winter, editors, Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science, chapter 6, pages 111–126. John Wiley & Sons Ltd.
- [Bäc 96] T. Bäck. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Oxford University Press, New York, 1996.
- [Bäc 92] Bäck T., „Self-Adaptation in Genetic Algorithms“, Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, MIT Press (1992).
- [Bäc 93] Bäck T., „Optimal Mutation Rates in Genetic Search“, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, California, pp. 2-8 (1993).

- [Cal 00] Caldas L. Evolving three-dimensional architecture form: an application to low-energy design, in: J.S. Gero (Ed.), Artificial Intelligence in Design'02, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, pp. 351–370, 2000.
- [Cal 03] L.G. Caldas, L.K. Norford, Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems, *Journal of Solar Energy Engineering* 125 (3) (2003) 343–351.
- [Can 15] Canto-Perello, J.; Martinez-Garcia, M.; Curiel-Esparza, J.; Martin-Utrillas, M. Implementing Sustainability Criteria for Selecting a Roof Assembly Typology in Medium Span Buildings, *Sustainability* 2015, 7, 6854-6871.
- [Cer 01] Ceranic, B., Fryer, C., and Baines, R. W. (2001). An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures. *Computers & Structures*, 79:1569–1581.
- [Cho 03] Chouchoulas, O. Shape evolution: an algorithmic method for conceptual architectural design combining shape grammars and genetic algorithms. Ph.D. Thesis, Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath, UK, 2003.
- [Cil 00] Cilly, F. H. (1900). The exact design of statically indeterminate frameworks, an exposition of its possibility but futility. *Trans. ASCE* 43, 353–407.
- [Coe 00] Coello, C.A.C., „Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems“, *Comput Ind*;41:113–27, (2000).

- [Coe 02] Coello Coello, C.A., Theoretical and Numerical Constraint-Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms: A Survey of the State of the Art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(11–12):1245–1287, January 2002.
- [Coe 07] Coello Coello, C.A., Gary B. Lamont and David A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2007 Springer Science+Business Media, LLC, New York, pp 31–47.
- [Cof 99] Cofaigh, E.O. ; Fitzgerald, E.; Alcock, R.; McNicholl, A.; Peltonen, V.; Marucco, A. *A green Vitruvius—Principles and Practice of Sustainable Architecture Design*, James & James Science Publishers) Ltd., London, 1999.
- [Coi 96] Coit, D.W.; Smith, A.E. & Tate, D.M. „Adaptive penalty methods for genetic optimization of constrained combinatorial problems“, *INFORMS Journal on Computing*, Vo. 6, No. 2, pp. 173–182, (1996).
- [Cul 75] Culmann, K. (1875). *Die graphische Statik*. Zurich: Meyer & Zeller.
- [Čan 96] Čangalović M., "Opšte heuristike za rešavanje problema kombinatorne optimizacije", u: *Kombinatorna optimizacija: Matematička teorija i algoritmi*, str. 320-350 (1996).
- [Dan 63] Dantzig, G.B., *Linear programming and extensions*, Rand Corporation and University of California, Berkeley 1963.
- [Dar 59] Darwin C., "The origin of species", London (1859).

- [Dav 91] Y. Davidor, Epistasis variance: a viewpoint on GA hardness, in: G. Rawlins (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufman, San Mateo, 1991, pp. 23–35.
- [Deb 01] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001.
- [DeL 15] De Lieto Vollaro, R.; Guattari, C.; Evangelisti, E.; Battista, G.; Carnielo, E.; Gori, P. Building energy performance analysis: A case study. *Energy Build.* 2015, **87**, 87–94.
- [Dem 95] Dems, K. and W. Gatkowski (1995). Optimal design of a truss configuration under multiloading conditions. *Struct. Opt.* 9, 262–265.
- [Dob 69] Dobbs, W. and L. P. Felton (1969). Optimization of truss geometry. *J. Struct. Div. ASCE* 95 (ST10), 2105–2119.
- [Dob 75] Dobbs, M. W. and R. B. Nelson (1975). Application of optimality criteria to automated structural design. *AIAA J.* 14 (10), 1436–1443.
- [Dod 11] Dodoo, A.; Gustavsson, L.; Sathre, R. Building energy-efficiency standards in a life cycle primary energy perspective, *Energy and Buildings* 2011, **43**, 1589–1597.
- [Dor 91] Dorigo M., Colorni A., Maniezzo V., "Positive Feedback as a Search Strategy", Technical Report, TR91-016, Politecnico di Milano, (1991).
- [Dor 92] Dorigo M., "Optimization, Learning and Natural Algorithms", Phd Thesis, Politecnico di Milano, (1991).

- [Dor 96] Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A., "Ant System: Optimizing by a Colony of Cooperating Agents", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B, Vol. 26, No. 1, pp. 29-41 (February 1996).
- [Dor 04] M. Dorigo and T. Stutzle, "Ant colony optimization", MIT Press, Cambridge, (2004).
- [Đuk 99] Đukić P., Pavlović M. (1999). *Ekologija i društvo*. Eko Centar. Beograd.
- [Esb 96] Esbensen, H. and Kuh, E.S.: Design space exploration using the genetic algorithm, In IEEE International Symposiumon Circuits and Systems (ISCAS'96), Volume 4, pp 500–503, IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 1996.
- [EU 01] Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32001L0077>
- [EU 04] Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the Promotion of Cogeneration Based on the Useful Heat Demand in the Internal Energy Market and Amending Directive 92/42/EEC. *Official Journal of the European Union*, L 052, 50–60. Available online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004L0008&qid=1438149574168>.

- [EU 10] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, L 153, 13–35. Available online: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0031>.
- [EU 15] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/The_EU_in_the_world-environment_2015.
- [Eva 14] Evangelisti, L.; Battista, G.; Guattari, C.; Basilicata, C.; de Lieto Vollaro, R. Influence of the Thermal Inertia in the European Simplified Procedures for the Assessment of Buildings' Energy Performance. *Sustainability* 2014, 6, 4514–4524.
- [Fad 96] Fadaee MJ, Grierson DE. Design optimization of 3D reinforced concrete structures. *Struct. Optim.*, 1996;12: 127-134.
- [Fil 06] Filipović, V., "Operatori selekcije i migracije i WEB servisi kod paralelnih evolutivnih algoritama", Doktorska disertacija, Matematički fakultet, Beograd (2006).
- [Fil 98] Filipović V. "Predlog poboljšanja operatora turnirske selekcije kod genetskih algoritama", Magistarski rad, Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet (1998).
- [Fis 04] Fisher M., "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", *Management Science* 50, pp. 1872-1874 (2004).
- [Flo 87] Floudas, C. and Pardalos, P., „A Collection of Test Problems for Constrained Global Optimization“, volume 455 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, (1987).

- [Fon 96] Fonseca,C.M. and Fleming,P.J.: On the performance assessment and comparison of stochastic multiobjective optimizers. In Voigt, H.M., Ebeling, W., Rechenberg, I. And Schwefel, H.P., editors, Fourth International Conferenceon Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-IV), pp 584–593, Springer, Berlin, Germany, 1996.
- [Fon 98a] C.M. Fonseca, P.J. Flemming, Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms part 1: A unified formulation, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Part A 28 (1) (1998) 26–37.
- [Fon 98b] Fonseca, C.M. and Fleming, P.J.: Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms – part II: Application example, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 28(1), pp 38–47, 1998.
- [Gal 38] Galileo Galilei (1638). *Discorsi e Dimonstrazioni Matematiche, Interno, a Due Nuove Scienze*. Leida.
- [Ger 56] Gerard G., Minimum Weight Analysis of Compression Structures. New York: New York University Press, 1956.
- [Gil 01] Gil, L. and Andreu, A. (2001). Shape and cross-section optimisation of a truss structure. *Computers & Structures*, 79:681–689.
- [Glo 03] Glover F., Kochenberger G.A., "Handbook of Metaheuristics", Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London (2003).
- [Glo 90] Glover F., "Tabu search: A Tutorial", *Interfaces* 20, pp. 74-94 (1990).
- [Glo 97] F. Glover, F. Laguna, "Tabu search", Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA (1997).

- [Gol 89] Goldberg D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Mass., pp 412, (1989).
- [Gos 96] Goslingt, P. D. and Lewist, W. J. (1996). Optimal structural membranes-II. Form-finding of prestressed membranes using a curved quadrilateral finite element for surface definition. *Computers & Structures*, 61(5):895–895.
- [Gre 01] Greiner, D., Winter, G., and Emperador, J. M. (2001). Optimising frame structures by different strategies of genetic algorithms. *Finite Elements in Analysis and Design*, 37:381–402.
- [Gre 03] Greiner, D., Winter, G., and Emperador, J. M. (2003). Searching for an efficient method in multiobjective frame optimisation using evolutionary algorithms. In Bathe, K. J., editor, Second MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, volume 2, pages 2285–2290, Oxford, UK. Elsevier Ltd.
- [Gri 93] Grierson, D. E. and C.-M. Chan (1993). An optimality criteria design method for tall steel buildings. *Advances in Engineering Software* 16, 119–125.
- [Gri 02] D.E. Grierson, S. Khajehpour, Method of conceptual design applied to office buildings, *Journal of Computing in Civil Engineering* 16 (2) (2002) 83–103.
- [Gug 07] Gugliermetti, F.; Bisegna, F. Saving energy in residential buildings: The use of fully reversible windows. *Energy* 2007, 32, 1235–1247.
- [Gus 10] Gustavsson, L.; Joelsson, A. Life cycle primary energy analysis of residential buildings, *Energy and Buildings* 2010, 42, 210–220.

- [Haf 90] Haftka, R. T., Z. Gurdal, and M. P. Kamat (1990). Elements of Structural Optimization. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [Ham 00] Hamida, S.B. & Schoenauer, M. „An adaptive algorithm for constrained optimization problems“, *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VI*, Vo. 1917, pp. 529–538, Berlin. Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science, (2000).
- [Ham 02] Hamida, S. and Schoenauer M., „ASCHEA: new results using adaptive segregational constraint handling“, in *Proc. of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, volume 1, pages 884–889, May (2002).
- [Han 01] P. Hansen and N. Mladenović, "Variable neighborhood search: Principles and applications," European Journal of Operational Research 130, pp. 449-467, 2001
- [Han 07] Hansen P., Brimberg J., Urošević D., Mladenović N., "Primal-Dual Variable Neighborhood Search for the Simple Plant-Location Problem", INFORMS Journal on Computing 19, pp. 552-564 (2007).
- [Her 97] Hertz A., Taillard E., de Werra D., "Tabu search", In: Local Search in Combinatorial Optimization, Aarts E.H.L. and Lenstra J.K. (eds.), John Wiley & Sons Ltd., pp. 121-136 (1997).
- [Him 72] Himmelblau, D. „ Applied Nonlinear Programming“, McGraw-Hill, New-York, 1972.
- [Hil 75] Holland J.H., „Adaptation in Natural and Artificial Systems“, The University of Michigan Press, Ann Arbor (1975).

- [Hoc 81] Hock, W. and Schittkowski, K., „Test Examples for Nonlinear Programming Codes“, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer-Verlag, Berlin, Germany, (1981).
- [Hol 75] Holland, J. ,H. , Adaptation in natural and artificial systems, Ann Arbor MI, The University of Michigan Press, 1975.
- [Hut 02] Hutter M., "Fitness Uniform Selection to Preserve Genetic Diversity", in Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, CEC-2002, Hawaii, pp. 783-788 (2002).
- [Ima 82] Imai, K. and L. A. Schmit (1982). Configuration optimization of trusses. *J. Struct. Div. ASCE* 107 (ST5), 745–756.
- [Jer 00] Jedrzejuk H., Marks W. Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization: partial problems solution, *Building and Environment* 37 (11) pp. 1037–1043, 2000.
- [Kam 01] Kameshki, E. S. and Saka, M. P. (2001). Optimum design of non-linear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm. *Computers & Structures*, 79:1593–1604.
- [Kar 39] Karush, W., Minima of functions of several variables with inequalities as side conditions, MSc Thesis, University of Chicago, 1939.
- [Kav 04] Kaveh, A.; Abditehrani, A. Design of frames using genetic algorithm, force method and graph theory, *Int J Numer Methods Eng* 2004, 61, 2555–2565.
- [Kav 13] Kaveh, A.; Laknejadi, K. A hybrid evolutionary graph-based multi-objective algorithm for layout optimization of truss structures, *Acta Mechanica*, 2013, 224, 343–364.

- [Ken 01] Kennedy, J.; Eberhart, R.; Shi, Y. Swarm intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [Kim 02] Kim, H. and Baker, G. (2002). Topology optimization for reinforced concrete design. In [Man02].
- [Kir 95] Kirsch, U. (1995). Layout optimization using reduction and expansion processes. In [Olhoff and Rozvany, 1995], pages 95–102.
- [Kov 08] Kovačević, J., "Hybrid Genetic Algorithm For Solving The Low-Autocorrelation Binary Sequence Problem", Yugoslav Journal of Operations Research (2008).
- [Koz 99] Koziel, S. and Michalewicz, Z., „Evolutionary algorithms, homomorphous mappings and constrained parameter optimization“, *Evolutionary Computation*, 7(1):19–44, (1999).
- [Kra 00] Krarup J., Pruzan P. M., "The simple plant location problem: Survey and synthesis", European Journal of Operational Research, Vol. 12, pp. 36-81 (1983).
- [Krp 83] Krarup J., Pruzan P. M., "The simple plant location problem: Survey and synthesis", European Journal of Operational Research, Vol. 12, pp. 36-81 (1983).
- [Kuh 51] Kuhn, H.W. and Tucker, A. W., Nonlinear Programming, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Math. Statist. and Prob. (Univ. of Calif. Press, 1951), 481-492.
- [Laz 38] Lazarević, Đ., Prilog za racionalno dimenzioniranje savijenih nosača od armiranog betona, Građevinski vjesnik, VII, 65–67, 1938.

- [Lee 04a] Lee KS, Geem ZW., „A new structural optimization method based on the harmony search algorithm“, Comput Struct;82:781–98 (2004).
- [Leg 04b] Legg S, Hutter M, Kumar A.: "Tournament versus Fitness Uniform Selection", Technical Report, IDSIA-04-04 (2004).
- [Lia 99] Liang, Q. Q., Xie, Y. M., and Steven, G. P. (1999). Optimal strut-and-tie models in structural concrete members. In Topping, B. H. V. and Kumar, B., editors, Optimization and Control in Civil and Structural Engineering, pages 1–8.
- [Lin 82] Lin, J. H., W. Y. Che, and Y. S. Yu (1982). Structural optimization on geometrical configuration and element sizing with statical and dynamical constraints. Comput. Struct. 15, 507–515.
- [Liv 56] Livesley, R. K., The automatic design of structural frames, Quart. J. Mech. Appl. Math., 9, 257-258, 1956.
- [Man 02] Manwell, J. F. McGowan, J.G. Rogers, A. L.(2002). *Wind energy explained*. John Wiley & Sons Ltd.
- [Mar 10] Marković, D. (2010). *Procesna i energetska efikasnost*. Beograd.183.
- [Max 90] Maxwell, J. C. (1890). On reciprocal figures, frames, and diagrams of forces. Scientific Papers 2, 161–207.
- [Men 01] Mendler, S.; Odell, M. The HOK Guidebook to Sustainable Design, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [Mic 04] Michell, A. G. M. (1904). The limits of economy in frame structures. Philo-sophical Magazine Sect. 6, 8 (47), 589–597.

- [Mic 96] Z. Michalewicz, D. Dasgupta, R.G. Le Riche, and M. Schoenauer. Evolutionary algorithms for constrained engineering problems. *Computers & Industrial Engineering Journal*, 30(2):851–870, 1996.
- [Mil 01] Miles, J.C.; Sisk, G.M.: Moore, C.J. The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm, *Computers and Structures* 2001, 79 (17) 1583–1592.
- [Mil 12a] Milajić, A. Optimalno dimenzionisanje rešetkastih nosača primenom samoprilagođavajućih metaheuristika, doktorska disertacija, Univerzitet Union Nikola Tesla, 2012.
- [Mil 12b] Milovanović, J. (2012). *Životna sredina i biodiverzitet*. Beograd.
- [Mil 14] Milajić, A., Beljaković, D., Barović, D. (2014). *Optimum truss design using Big Bang – Big Crunch algorithm*, In conference proceedings of International conference Contemporary achievements in civil engineering 2014, Subotica, Serbia, pp. 447-453.
- [Mis 05] Misevicius, A., "A tabu search algorithm for the quadratic assignment problem," Computational Optimization and Applications 30, pp. 95-111, 2005.
- [Mit 77] Mitchell W.J.. Computer-Aided Architectural Design, Petrocelli/Charter, New York, 1977.
- [Mit 99] Mitchell M., "An Introduction to Genetic Algorithms", MIT Press, Cambridge, Massachusetts, (1999).
- [Moh 93] Moharrami, H. , Grierson, D.E., Computer automated design of reinforced concrete frameworks. *J. Struct. Eng.ASCE*, 1993; 119 (7), 2036-2058.

- [Mur 13] Murgul, V. Solar energy in the reconstruction of urban environment of historic building Saint-Petersburg, *Architecture and Modern Information Technologies*, 2013, 2 (23), 1–24.
- [Mur 15] Murgul, V.; Pukhkal, V.; Vatin, N. Thermal Insulation Features of Residential Historical Buildings in the Case of Saint-Petersburg, *Applied Mechanics and Materials* 2015, 725-726, pp. 1477–1485.
- [Müh 97] Mühlenbein H., "Genetic Algorithms", Local Search in Combinatorial Optimization, eds. Aarts E.H.L., Lenstra J.K., John Wiley & Sons Ltd., pp. 137-172 (1997).
- [Nan 01] Nanakorn, P., Meesomklin, K., „An adaptive penalty function in genetic algorithms for structural design optimization“, *Comput Struct*, 79:2527–39 (2001).
- [Nau 00] B. Naudts, L. Kallel, Comparison of predictive measures of problem difficulty in evolutionary algorithms, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 4 (1) (2000) 1–15.
- [Olh 80] Olhoff, N. (1980). Optimal design with respect to structural eigenvalues. In Proc. 15th IUTAM Congress, Toronto, Canada, pp. 133–149.
- [Ohs 97] Ohsaki, M., T. Nakamura, and M. Kohiyama (1997). Shape optimization of a double-layer space truss described by a parametric surface. *Int. J. Space Struct.* 12 (2), 109–119.
- [Ohs 98] Ohsaki, M., T. Nakamura, and Y. Isshiki (1998). Shape-size optimization of plane trusses with designer's preference. *J. Struct. Eng.* 124 (11), 1323–1330.

- [Ohs 99a] Ohsaki, M. and Y. Kato (1999). Simultaneous optimization of topology and nodal locations of a plane truss associated with a Bézier curve. In Structural Engineering in the 21st Century, Proc. Structures Congress, pp. 582–585. ASCE.
- [Ohs 99b] Ohsaki, M., K. Fujisawa, N. Katoh, and Y. Kanno (1999). Semi-definite programming for topology optimization of trusses under multiple eigen-value constraints. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 180, 203–217.
- [Ohs 00] Ohsaki, M. and M. Hayashi (2000). Fairness metrics for shape optimization of ribbed shells. J. Int. Assoc. Shells and Spatial Struct. 41 (1), 31–39.
- [Ohs 03] Ohsaki, M., T. Ogawa, and R. Tateishi (2003). Shape optimization of curves and surfaces considering fairness metrics and elastic stiffness. Struct. Multidisc. Optim. 24, 449–456. Erratum: 27, pp. 250–258, 2004.
- [Ohs 05] Ohsaki, M. and N. Katoh (2005). Topology optimization of trusses with stress and local constraints on nodal stability and member intersection. Struct. Multidisc. Optim. 29, 190–197.
- [Ohs 07a] Ohsaki, M. and S. Nishiwaki (2007a). Generation of link mechanism by shape-topology optimization of trusses considering geometrical nonlinearity. J. Computational Science and Technology, JSME 3 (1), pp. 46–53, 2009.
- [Ohs 07b] Ohsaki, M. and K. Ikeda (2007). Stability and Optimization of Structures – Generalized Sensitivity Analysis. Mechanical Engineering Series. New York: Springer.

- [Ohs 08] Ohsaki, M. and R. Watada (2008). Linear mixed integer programming for topology optimization of trusses and plates. In Proc. 6th Int. Conf. On Computation of Shell and Spatial Structures, IASS-IACM, Ithaca, NY.
- [Ohs 09] Ohsaki, M., H. Tagawa, and P. Pan (2009). Shape optimization of reduced beam section for maximum plastic energy dissipation under cyclic loads. *J. Const. Steel Res.* 65, 1511–1519.
- [Ohs 11] Ohsaki, M., Optimization of Finite Dimensional Structures, Taylor & Francis Group, 2011.
- [Ong 04] Ongsakul W., Petcharaks N., "Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation", *IEEE Transactions Power Systems* 19, pp. 620-628 (2004).
- [Osm 96a] Osman I.H., Kelly J.P., "Metaheuristics: Theory and Applications", Kluwer Academic Publisher, Norwell (1996).
- [Osm 96b] Osman I.H., Laporte G., "Metaheuristic: A bibliography", *Annals of Operations Research*, Vol. 63, pp. 513-623 (1996).
- [Pag 15] Francesca Pagliaro, Lucia Cellucci, Chiara Burattini, Fabio Bisegna, Franco Gugliermetti, Andrea de Lieto Vollaro, Ferdinando Salata and Iacopo Golasi, A Methodological Comparison between Energy and Environmental Performance Evaluation, *Sustainability* 2015, 7, 10324–10342.
- [Par 96] Pareto, V. (1896). *Cours D'Economie Politique*, volume 1. Lausanne: F. Rouge.
- [Pav 12a] Iva Pavlović, LEED standard, *Ambijenti*, Green Building Conference and Exhibition 2012, pp. 32-37.

- [Pav 12b] Iva Pavlović, HQE sertifikacija, *Ambijenti*, Green Building Conference and Exhibition 2012, pp. 38-43.
- [Ped 00] Pedersen, P. (2000). On optimal shapes in materials and structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 19:169–182.
- [Pei 99] Peippo K. et al.. Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings, *Energy and Building* 29 (2), pp. 189–205, 1999.
- [Peš 02] Pešić, R. (2002). *Održivi razvoj - Nastanak koncepta održivog razvoja*. Ekonomija prirodnih resursa i životne sredine. Beograd. Poljoprivredni fakultet. str.12-14.
- [Pra 67] Prager, W. (1967). Optimum plastic design of a portal frame for alternative loads. *J. Appl. Mech.* 34, 772–773.
- [Pra 68] Prager, W. and J. E. Taylor (1968). Problem of optimal structural design. *J. Appl. Mech.* 35 (1), 102–106.
- [Pra 71] Prager, W. (1971). Foulkes mechanism in optimal plastic design for alternative loads. *Int. J. Mech. Sci.* 13, 971–973.
- [Pra 72] Prager, W. (1972). Conditions for structural optimality. *Comput. Struct.* 2, 833–840.
- [Pra 74a] Prager, W. (1974). *Introduction to Structural Optimization*. Vienna: Springer.
- [Pra 74b] Prager, W. (1974). A note on discretized Michell structure. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 3, 349–355.
- [Pra 76] Prager, W. (1976). Geometric discussion of the optimal design of a simple truss. *J. Struct. Mech.* 4 (1), 57–63.

- [Pra 92] Praščević, Ž., Operaciona istraživanja u građevinarstvu – determinističke metode, Građevinski fakultet u Beogradu, 1992.
- [Pus 14] Pusat, S; Erdem, H.H. Techno-economic model for district heating systems. *Energy Build* 2014, 72, 177–185.
- [Ram 10] Ramesh, T.; Prakash, R.; Shukla, K.K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.* 2010, 42, 1592–1600.
- [Rib 02] Ribeiro C.C, Hansen P., "Essays and Surveys in Metaheuristics", Operations Research/Computer Science Interfaces Series;ORCS.
- [Ron 00] R. Ronald, J. Asenstorfer, M. Vincent, Representational redundancy in evolutionary algorithms, in: D. Fogel (Ed.), Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE Press, New York, 1995, pp. 631–637.
- [Ron 01] Rong, J. H., Xie, Y. M., and Yang, X. Y. (2001). An improved method for evolutionary structural optimisation against buckling. *Computers & Structures*, 79:253–263.
- [Ros 99] Rosenman M.A., Gero J.S.. Evolving designs by generating useful complex gene structures, in: P.J. Bentley (Ed.), Evolutionary Design by Computers, Morgan Kaufman, San Francisco, pp. 345–364, 1999.
- [Rou 98] J. O'Rourke, Computational Geometry in C, second ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.

- [RS 11] Akcioni plan za sprovođenje Nacionalne strategije održivog razvoja za period od 2011. do 2017. Godine, Sl. Glasnik RS, br. 62/2011.
<http://www.pks.rs/SADRZAJ/Files/Akcioni-plan-za-sprovodjenje-NSOR.pdf>
- [RSM 04] Building construction cost data. Kingston, MA, RS Means, 2004.
- [Rud 98] Rudolph, G.: On a multiobjective evolutionary algorithm and its convergence to the pareto set. In IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'98), pp 511–516, IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 1998.
- [Rui 09] Ruiyi, S., Liangjin, G., Zijie, F., „Truss Topology Optimization Using Genetic Algorithm with Individual Identification Technique“, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K.
- [Run 00] Runarsson, T.P. and Yao, X., „Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization“, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 4(3):284–294, (2000).
- [Sal 15] Salata, F.; de Lieto Vollaro, A.; de Lieto Vollaro, R.; Mancieri, L. Method for energy optimization with reliability analysis of a trigeneration and teleheating system on urban scale: A case study. *Energy Build* 2015, 86, 118–136.
- [San 08] San Bruno, G., Fried, L. (2008). Focus on Small Hydro, *Renewable energy focus*. november/december pp.55.
- [Sch 01] Schwarz, S., Maute, K., and Ramm, E. (2001). Topology and shape optimization for elastoplastic structural response. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190:2135–2155.

- [Sch 03] Schutte, J. F. and A. A. Groenwold (2003). Sizing design of truss structures using particle swarm. *Struct. Multidisc. Optim.* 25, 261–269.
- [Set 08] Sethi V.P., Sharma S. K. (2008). *Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications*. Solar energy. Vol.82, No.9. pp.832 - 859.
- [Sha 11] Sharma, A.; Saxena, A.; Sethi, M.; Shree, V.; Varun. Life-cycle assessment of buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, 15, 871–875.
- [Sha 96] Shaviv, E.; Yezioro, A.; Capeluto, I.G.; Peleg, U.J.; Kalay, Y.E. Simulations and knowledge-based computer-aided architectural design (CAAD) systems for passive and low energy architecture, *Energy and Buildings* 1996, 23(3), 257–269.
- [Sha 52] Shanley, Weight-Strength Analysis of Aircraft Structures, McGraw-Hill, New York, 1952.
- [Spe 91] Spears W., De Jong K., „On the Virtues of Parametrized Uniform Crossover“, Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Mateo, Calif., pp. 230-236 (1991).
- [Sri 94] Srinivas M., Patnaik L.M., „Genetic Algorithms: A Survey“, IEEE Computer, pp. 17-26 (June 1994).
- [Ste 03] G. Steven, Product and system optimization in engineering simulation. FENet Newsletter, January 2003.
- [Sum 06] Suman B., Kumar P., "A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization", Journal of the operational research society 57 pp. 1143–1160 (2006).

- [Sva 69] Svanberg, K. (1981). Optimization of geometry in truss design. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 28, 63–80.
- [Sza 98] J. Szargut, D.R. Morris, F.R. Steward, Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Process, Hemisphere, New York, 1998.
- [Štr 12] Šrbac, N. Vuković, M., Voza, D. Sokić, M. (2012). *Održivi razvoj i zaštita životne sredine*. Univerzitet u Beogradu. Tehnički fakultet, Bor. Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina (ITNMS). Beograd. str.18.
- [Tan 02] K.C. Tan, T.H. Lee, E.F. Khor, Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: performance assessments and comparisons, Artificial Intelligence Review 17 (4) (2002) 253–290.
- [Tan 06] Tang L., Xuan H., Liu, J., "A new Lagrangian relaxation algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize total weighted completion time", Computers and Operations Research 33, pp. 3344 – 3359 (2006).
- [Toğ 06] Toğan V, Daloğlu AT., „Optimization of 3d trusses with adaptive approach in genetic algorithms“, Eng Struct;28:1019–27. (2006).
- [Toš 04] Tošić D., Mladenović N., Kratica J., Filipović V., „Genetski algoritmi“, Matematički institut SANU, Beograd (2004).
- [Twu 92] Twu, S.-L. and K. K. Choi (1992). Configuration design sensitivity analysis of built-up structures, Part I: Theory. Int. J. Numer. Methods Eng. 35, 1127–1150.
- [UN 87] Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, Oxford ; New York : Oxford University Press, 1987.

- [UN 92a] The United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- [UN 92b] The United Nations Convention on Biological Diversity (CBD)
<https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
- [UN 92c] Agenda 21 : Programme of Action for Sustainable Development ; Rio Declaration On Environment and Development ; Statement of Forest Principles: The Final Text of Agreements Negotiated By Governments At the United Nations Conference On Environment and Development (UNCED), 3-14 June 1992, Rio De Janeiro, Brazil.
[https://sustainabledevelopment.un.org/
content/documents/Agenda21.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf)
- [UN 97] United Nations 1997 Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- [UN 98] United Nations 1998 Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Available online:
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.
- [Unk 12] Unković, M. (2012). Održivi razvoj i ekologija, Beograd: Univerzitet Singidunum, str. 12
- [Uze 12a] Mirjana Uzelac Filipendin, BREEAM standard, *Ambijenti*, Green Building Conference and Exhibition 2012, pp. 44-51.
- [Uze 12b] Mirjana Uzelac Filipendin, DGNB standard, *Ambijenti*, Green Building Conference and Exhibition 2012, pp. 52-61.

- [Vas 06] Vasović V., Biočanin R. (2006). *Održivi razvoj*. Ecologica. Naučno - stručno društvo za zaštitu. Novi Sad. 215.
- [Ven 73] Venkayya, V. B., N. S. Khot, and L. Berke (1973). Application of optimality criteria approaches on automated design of large practical structures. In Proc. 2nd Symp. on Structural Optimization, AGARD-CP-123, Milan, Italy, pp. 3.1–3.19.
- [Ven 78] Venkayya, V. B. (1978). Structural optimization: A review and some recommendations. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 13, 203–228.
- [Ven 83] Venkayya, V. B. and V. A. Tishler (1983). Optimization of structures with frequency constraints. In Computer Methods in Nonlinear Solids Structural Mechanics, ASME-AMD-54, pp. 239–259. New York: ASME.
- [Vol 05] Volker, Q. (2005). *Understanding renewable energy systems*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG.
- [Vuj 99] Vujošević, M., Operaciona istraživanja – Izabrana poglavlja, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 1999.
- [Wan 05a] Wang, W. et al. An object-oriented framework for simulation-based green building design optimization with genetic algorithms, *Advanced Engineering Informatics* 19 (1) pp. 5–23, 2005.
- [Wan 05b] Wang, W. et al., Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization, *Building and Environment* 40 (11) pp. 1512–1525, 2005.
- [Yos 02] Yoshimura, S., Dennis, B., and Kawai, H. (2002). Generalized approach to parallel shape optimization with millions DOF finite element model. In [Mang et al., 2002].

- [Yos 95] Yoshimura, M. and Inoue, N. (1995). Optimization strategy for detailed designs of reinforced column structures using pareto optimum solutions of ideal models. In [Olhoff and Rozvany, 1995], pages 783–788.
- [Zho 91] Zhou, M. and G. I. N. Rozvany (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 89, 309–336.
- [Zie 95] Zielinski ZA, Long W, Troitsky MS. Designing reinforced concrete short-tied columns using the optimization technique. ACI Struct. J., 1995;92(5):619-626.
- [Zit 98] Zitzler, E. And Thiele, L.: Multiobjective optimization using evolutionary algorithms – a comparative case study. In Eiben, A. E., Back, T., Schoenauer, M. and Schwefel, H.P., editors, Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-V), pp 292–301, Springer, Berlin, Germany, 1998.
- [Zit 99] Zitzler, E. And Thiele, L.: Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(4), pp 257–271, 1999.
- [Zit 00] Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L.: Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results, 2000, Evolutionary Computation 8(2): 173-195.
- [Zit 03] E. Zitzler, L. Thiele, M. Laumanns, C.M. Fonseca, V.G. Fonseca, Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review, IEEE Transactions on Evolutionary Computation 7 (2) (2003) 117–132.

- [Zou 05] Zou, X.-K. and C.-M. Chan (2005). An optimal resizing technique for seismic drift design of concrete buildings subjected to response spectrum and time history loadings. *Comput. Struct.* 83, 1689–1704.

Prilog: Problemi iz paketa *G-Suite*

Problem G01

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = 5 \sum_{i=1}^4 x_i - 5 \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \sum_{i=5}^{13} x_i$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = 2x_1 + 2x_2 + x_{10} + x_{11} - 10 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = 2x_1 + 2x_3 + x_{10} + x_{12} - 10 \leq 0$$

$$g_{3(x)} = 2x_2 + 2x_3 + x_{11} + x_{12} - 10 \leq 0$$

$$g_{4(x)} = -8x_1 + x_{10} \leq 0$$

$$g_{5(x)} = -8x_2 + x_{11} \leq 0$$

$$g_{6(x)} = -8x_3 + x_{12} \leq 0$$

$$g_{7(x)} = -2x_4 - x_5 + x_{10} \leq 0$$

$$g_{8(x)} = -2x_6 - x_7 + x_{11} \leq 0$$

$$g_{9(x)} = -2x_8 - x_9 + x_{12} \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$0 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, 9$$

$$0 \leq x_i \leq 100, i = 10, 11, 12$$

$$0 \leq x_{13} \leq 1$$

Globalni minimum postiže se za:

$$\vec{x}^* = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1]$$

uz aktivne uslove ograničenja:

$$g_1, g_2, g_3, g_7, g_8, g_9$$

i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = -15$$

Problem G02

Odrediti maksimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \cos^4(x_i) - 2 \prod_{i=1}^n \cos^2(x_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n i x_i^2}} \right|$$

Uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = 0,75 - \prod_{i=1}^n x_i \leq 0$$

$$g_{2(x)} = \sum_{i=1}^n x_i - 7,5n \leq 0$$

gde je:

$$n = 20$$

$$0 \leq x_i \leq 10, i = 1, \dots, n$$

Globalni minimum je još nepoznat, a najbolje dosad pronađeno rešenje iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = -0,803619$$

Problem G03

Odrediti maksimalnu vrednost funkcije:

$$f_{(\vec{x})} = (\sqrt{n})^n \prod_{i=1}^n x_i$$

uz uslov:

$$h_{1(x)} = \sum_{i=1}^n x_i^2 - 1 = 0$$

gde je:

$$n = 10$$

$$0 \leq x_i \leq 1, i = 1, \dots, n$$

Globalni minimum postiže se za:

$$x_i^* = \frac{1}{\sqrt{n}}, i = 1, \dots, n$$

i iznosi:

$$f_{(\vec{x}^*)} = 1$$

Problem G04

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = 5,3578547x_3^2 + 0,8356891x_1x_5 + 37,293239x_1 - 40792,141$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = 85,33407 + 0,0056858x_2x_5 + 0,0006262x_1x_4 - 0,0022053x_3x_5 - 92 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = -85,33407 - 0,0056858x_2x_5 - 0,0006262x_1x_4 + 0,0022053x_3x_5 \leq 0$$

$$g_{3(x)} = 80,51249 + 0,0071317x_2x_5 + 0,0029955x_1x_2 + 0,0021813x_3^2 - 110 \leq 0$$

$$g_{4(x)} = -80,51249 - 0,0071317x_2x_5 - 0,0029955x_1x_2 - 0,0021813x_3^2 + 90 \leq 0$$

$$g_{5(x)} = 9,300961 + 0,0047026x_3x_5 + 0,0012547x_1x_3 + 0,0019085x_3x_4 - 25 \leq 0$$

$$\begin{aligned} g_{6(x)} &= -9,300961 - 0,0047026x_3x_5 - 0,0012547x_1x_3 - 0,0019085x_3x_4 + 20 \\ &\leq 0 \end{aligned}$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$78 \leq x_1 \leq 102,33$$

$$33 \leq x_2 \leq 45$$

$$27 \leq x_i \leq 45, i = 3, 4, 5$$

Globalni minimum postiže se za:

$$\vec{x}^* = [78; 33; 29,995256025682; 45; 36,775812905788]$$

uz aktivne uslove ograničenja:

$$g_1, g_6$$

i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = -30665,539$$

Problem G05

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = 3x_1 + 0,000001x_1^3 + 2x_2 + 0,000002x_2^3/3$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = -x_4 + x_3 - 0,55 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = -x_3 + x_4 - 0,55 \leq 0$$

$$h_{3(x)} = 1000 \sin(-x_3 - 0,25) + 1000 \sin(-x_4 - 0,25) + 894,8 - x_1 = 0$$

$$h_{4(x)} = 1000 \sin(x_3 - 0,25) + 1000 \sin(x_3 - x_4 - 0,25) + 894,8 - x_2 = 0$$

$$h_{5(x)} = 1000 \sin(x_4 - 0,25) + 1000 \sin(x_4 - x_3 - 0,25) + 1294,8 = 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$0 \leq x_1, x_2 \leq 1200$$

$$-0,55 \leq x_3, x_4 \leq 0,55$$

Najbolje poznato rešenje postiže se za:

$$\vec{x}^* = [679,9453; 1026,067; 0,1188764; -0,3962336]$$

i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 5126,4981$$

Problem G06

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = (x_1 - 10)^3 + (x_2 - 20)^3$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 100 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = (x_1 - 6)^2 - (x_2 - 5)^2 - 82,81 \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$13 \leq x_1 \leq 100$$

$$0 \leq x_2 \leq 100$$

Traženo rešenje postiže se za:

$$\vec{x}^* = [14,095; 0,84296]$$

uz aktivna oba uslova ograničenja i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = -6961,81388$$

Problem G07

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 - 14x_1 - 16x_2 + (x_3 - 10)^2 + 4(x_4 - 5)^2 + (x_5 - 3)^2 + 2(x_6 - 1)^2 + 5x_7^2 + 7(x_8 - 11)^2 + 2(x_9 - 10)^2 + (x_{10} - 7)^2 + 45$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = +4x_1 + 5x_2 - 3x_7 + 9x_8 - 105 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = 10x_1 - 8x_2 - 17x_7 + 2x_8 \leq 0$$

$$g_{3(x)} = -8x_1 + 2x_2 + 5x_9 - 2x_{10} - 12 \leq 0$$

$$g_{4(x)} = 3(x_1 - 2)^2 + 4(x_2 - 3)^2 + 2x_3^2 - 7x_4 - 120 \leq 0$$

$$g_{5(x)} = 5x_1^2 + 8x_2 + (x_3 - 6)^2 - 2x_4 - 40 \leq 0$$

$$g_{6(x)} = x_1^2 + 2(x_2 - 2)^2 - 2x_1x_2 + 14x_5 - 6x_6 \leq 0$$

$$g_{7(x)} = 0,5(x_1 - 8)^2 + 2(x_2 - 4)^2 + 3x_5^2 - x_6 - 30 \leq 0$$

$$g_{8(x)} = -3x_1 + 6x_2 + 12(x_9 - 8)^2 - 7x_{10} \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$-10 \leq x_i \leq 10, i = 1, 2, \dots, 10$$

Globalni minimum postiže se za:

$$\vec{x}^* = \begin{bmatrix} 2,171996; 2,363683; 8,773926; 5,095984; 0,9906548; \\ 1,430574; 1,321644; 9,828726; 8,280092; 8,375927 \end{bmatrix}$$

uz aktivne uslove ograničenja:

$$g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$$

i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 24,3062091$$

Problem G08

Odrediti maksimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = \frac{\sin^3(2\pi x_1)\sin(2\pi x_2)}{x_1^3(x_1 + x_2)}$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = x_1^2 - x_2 + 1 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = 1 - x_1 + (x_2 - 4)^2 \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$0 \leq x_1 \leq 10$$

$$0 \leq x_2 \leq 10$$

Traženo rešenje postiže se za:

$$\vec{x}^* = [1,2279713; 4,2453733]$$

uz aktivna oba uslova ograničenja i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 0,095825$$

Problem G09

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = (x_1 - 10)^2 + 5(x_2 - 12)^2 + x_3^4 + 3(x_4 - 11)^2 + 10x_5^6 + 7x_6^2 + x_7^4 - 4x_6x_7 - 10x_6 - 8x_7$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = 2x_1^2 + 3x_2^4 + x_3 + 4x_4^2 + 5x_5 - 127 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = 7x_1 + 3x_2 + 10x_3^2 + x_4 - x_5 - 282 \leq 0$$

$$g_{3(x)} = 23x_1 + x_2^2 + 6x_6^2 + 8x_7 - 196 \leq 0$$

$$g_{4(x)} = 4x_1^2 + x_2^2 - 3x_1x_2 + 2x_3^2 + 5x_6 - 11x_7 \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$-10 \leq x_i \leq 10, i = 1, \dots, 7$$

Traženo rešenje postiže se za:

$$\begin{aligned} \vec{x}^* \\ = [2,330499; 1,951372; 0,4775414; 4,365726; 0,6244870; 1,038131; 1,594227] \end{aligned}$$

uz aktivne uslove ograničenja g_1 i g_4 , a iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 680,6300573$$

Problem G10

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = x_1 + x_2 + x_3$$

uz uslove ograničenja:

$$g_{1(x)} = 0,0025(x_4 + x_6) - 1 \leq 0$$

$$g_{2(x)} = 0,0025(x_5 + x_7 - x_4) - 1 \leq 0$$

$$g_{3(x)} = 0,01(x_8 - x_5) - 1 \leq 0$$

$$g_{4(x)} = -x_1x_6 + 833,33252x_4 + 100x_1 - 83333,333 \leq 0$$

$$g_{5(x)} = -x_2x_7 + 1250x_5 + x_2x_4 - 1250x_4 \leq 0$$

$$g_{6(x)} = -x_3x_8 + 125000 + x_3x_5 - 2500x_5 \leq 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$100 \leq x_1 \leq 10.000$$

$$1.000 \leq x_2, x_3 \leq 10.000$$

$$10 \leq x_i \leq 1.000, i = 4, \dots, 8$$

Traženo rešenje postiže se za:

$$\begin{aligned} \vec{x}^* \\ = [579,3167; 1359,943; 5110,071; 182,0174; 295,5985; 217,9799; 286,4162; 395,5979] \end{aligned}$$

uz aktivne uslove ograničenja g_1 i g_4 , a iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 7049,3307$$

Problem G11

Odrediti minimalnu vrednost funkcije:

$$f(\vec{x}) = x_1^2 + (x_2 - 1)^2$$

uz uslov:

$$h_{1(x)} = x_2 - x_1^2 = 0$$

i oblast definisanosti promenljivih:

$$-1 \leq x_1, x_2 \leq 1$$

Globalni minimum postiže se za:

$$\vec{x}^* = \left[\pm \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{2} \right]$$

i iznosi:

$$f(\vec{x}^*) = 0,75$$



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Баровић (Драгана) Душан

број уговора са датумом потписивања: 3035/1 од 04. 12. 2014. год.

Изјављујем

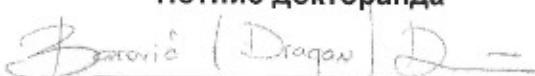
да је докторска дисертација под насловом

Обликовање и позиционирање објекта применом нумеричке оптимизације
у циљу побољшања његових перформанси у контексту енергетске
ефикасности

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 03. 12. 2018. год.



Баровић (Драгана) Душан

Универзитет "УНИОН-НИКОЛА ТЕСЛА"
БЕОГРАД, Цара Душана 62-64
бр. 3361
датум 03.12.2018. год.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Баровић (Драгана) Душан

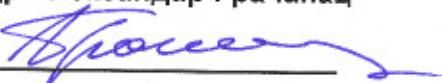
Број уговора са датумом потписивања: 3035/1 од 04. 12. 2014. год.

Студијски програм: менаџмент одрживог развоја

Наслов рада:

Обликовање и позиционирање објекта применом нумеричке оптимизације у циљу побољшања његових перформанси у контексту енергетске ефикасности

Ментор: проф. др Александар Грачанац

Потпис ментора 

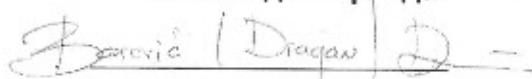
изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла Универзитетској библиотеци Универзитета „Унион-Нико Тесла“ у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета „Унион-Никола Тесла“ у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 03. 12. 2018. год.


Баровић (Драгана) Душан



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку Универзитет „Унион-Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Обликовање и позиционирање објекта применом нумеричке оптимизације
у циљу побољшања његових перформанси у контексту енергетске
ефикасности

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

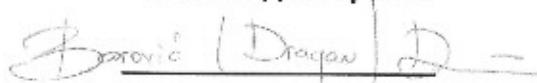
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета „Унион-Никола Тесла“ могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанта

У Београду, 03. 12. 2018. год.


Баровић (Драгана) Душан

Установа "УПТ "Д-НИКОЛА ТЕСЛА"
НСОГ: МД, Цара Душана 82-84
Бр. 3361
Датум: 03.12.2018. год.

1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцима, односно лиценцима отвореног кода.