

UNIVERZITET „UNION – NIKOLA TESLA“ U BEOGRADU

FAKULTET ZA GRADITELJSKI MENADŽMENT

Assedeq Asharee

**METODOLOGIJA IZBORA ADEKVATNE
PRORAČUNSKE METODE U
OPTIMALNOM PROJEKTOVANJU
ENERGETSKI EFIKASNIH ZGRADA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Beograd, 2017.

UNIVERSITY „UNION – NIKOLA TESLA“ OF BELGRADE

FACULTY OF CONSTRUCTION MANAGEMENT

Assedeq Asharee

**METHODOLOGY FOR ADEQUATE
CHOICE OF CALCULATION METHOD IN
OPTIMUM DESIGN OF ENERGY
EFFICIENT BUILDINGS**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 2017.

Metodologija izbora adekvatne proračunske metode u optimalnom projektovanju energetski efikasnih zgrada

APSTRAKT

Pri optimalnom projektovanju energetski efikasnih zgrada neophodno zadovoljiti dva suprotstavljena zahteva – ostvariti najmanji mogući uticaj na okolinu po prihvatljivoj ceni izgradnje, konstrukcije, opreme i troškova održavanja tokom čitavog životnog veka objekta. Da bi se rešio ovaj težak kombinatorni problem, neophodno je primeniti odgovarajuću metodu optimizacije koja će za relativno kratko vreme pružiti dovoljno širok izbor mogućih alternativa.

Cilj istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji bio je da se ustanovi univerzalan kriterijum za izbor adekvatne proračunske metode u optimalnom projektovanju energetski efikasnih zgrada. Rezultati ukazuju na to da primenjena metodologija pruža detaljan uvid u sposobnost različitih metoda da sprovedu kvalitetnu eksploraciju i eksploataciju prostora pretrage, pri čemu omogućava i detaljnu analizu dobijenog Pareto fronta. Pareto front dobijen u prikazanom numeričkom primeru sastoji se od tri jasno uočljive zone, od kojih dve sadrže rešenja u skladu s jednom od suprotstavljenih funkcija cilja (minimalna cena, odnosno minimalan uticaj na okolinu), dok treća zona predstavlja kompromina međurešenja. Primenom prikazanog pristupa projektant će moći da razmotri različite, u manjoj ili većoj meri zadovoljavajuće mogućnosti kako bi odabrao optimalno rešenje koje će u dovoljnoj meri zadovoljiti i ekonomski i ekološki kriterijum.

KLJUČNE REČI: optimalno projektovanje; višekriterijumska optimizacija; energetski efikasna zgrada; analiza životnog ciklusa; optimizacioni algoritmi.

Methodology for adequate choice of calculation method in optimum design of energy efficient buildings

ABSTRACT

Optimum design of an energy efficient building has to meet two confronted demands – to obtain the lowest possible environmental effects at an acceptable total price of construction, equipment and maintenance during the entire life cycle. In order to solve this hard combinatorial problem, it is necessary to implement adequate optimization tool that would provide sufficiently wide range of possible solutions within a reasonable time.

The aim of presented study was to establish universal criteria for adequate choice of calculation method in optimum design of energy efficient buildings. Results indicate that this adopted methodology provides deep insight in possibilities of different methods to perform high quality exploration and exploitation of the search space as well as thorough analysis of obtained Pareto front. Pareto front obtained in presented numerical example consists of three discrete areas, two of which refer to confronted fitness functions (minimal cost and minimal environmental impact), while the third one represents the intermediate solutions. This feature might enable designers to take different possibilities into consideration in order to make adequate decision about the optimum design that would meet both the economic and environmental demands.

KEYWORDS: optimum structural design; multi-objective optimization; energy efficient building; life cycle analysis.

SADRŽAJ

1. Uvod	1
1.1 Predmet istraživanja	1
1.2 Obrazloženje o potrebama istraživanja.....	5
1.3 Cilj istraživanja.....	7
1.4 Primenjena metodologija	7
1.5 Rezultati istraživanja i njihova primenljivost.....	8
1.6 Kratak sadržaj rada	9
2. Zelena gradnja	10
2.1 Uvodna razmatranja.....	10
2.2 Standardizacija zelenih zgrada	11
2.2.1 BREEAM standard	11
2.2.2 LEED standard	17
2.2.3 HQE šema sertifikacije.....	21
2.2.4 DGNB standard	24
2.3 Upravljanje kvalitetom	29
2.4 Projektovanje zelenih zgrada.....	32
2.5 Prioriteti u projektovanju zelenih zgrada.....	33
2.5.1 Ispitivanje pretpostavki.....	33
2.5.2 Korišćenje integrisanog procesa projektovanja.....	33
2.5.3 Prelaženje granice zadatog	33
2.5.4 Uključivanje osnovne strategije zelene gradnje u svakodnevnu praksu.....	34
2.5.5 Težnja za zelenim certifikatima za svoju zgradu.....	34
2.5.6 Primena kvalitetnih i sertifikovanih proizvoda	34
2.5.7 Smanjenje potrebe za grejanjem i hlađenjem	34
2.5.8 Smanjenje potrebe za transportom	35
2.5.9 Smanjenje potrošnje vode.....	35
2.5.10 Obezbeđenje zdravog ambijenta.....	36
2.5.11 Optimizacija upotrebe materijala.....	36
2.5.12 Zaštita i obnova okoline gradilišta.....	36

3. Optimalno projektovanje	37
3.1 Uvodna razmatranja.....	37
3.2 Istorijski razvoj.....	39
3.3 Formulacija i klasifikacija problema	41
3.4 Matematički model.....	43
3.5 Pojam optimalnosti u građevinarstvu	46
3.5.1 Studija slučaja.....	47
3.6 Optimizacija u funkciji održivosti	54
3.7 Višekriterijumska optimizacija.....	57
3.7.1 Heurističke metode	61
3.7.2 Metaheuristike	62
3.7.3 Evaluacija rešenja	63
4. Evaluacija metoda i rešenja	64
4.1 Uvodna razmatranja.....	64
4.2 Funkcije cilja	68
4.3 Optimizacioni algoritmi.....	69
4.3.1 Matematička formulacija.....	70
Hibridni algoritmi	71
4.4 Evaluacija rešenja	72
4.4.1 Funkcija preciznosti.....	72
4.4.2 Funkcija ujednačenosti	73
4.4.3 Funkcija pokrivenosti	74
4.5 Numerički primer	75
4.6 Rezultati i diskusija	78
5. Zaključak	84
5.1 Zadaci i ostvareni rezultati	84
5.2 Naučni i stručni doprinos disertacije	86
5.3 Pravci i smernice za dalja istraživanja.....	88
6. Literatura	89

1. Uvod

1.1 Predmet istraživanja

Procenjuje se da energija koja se troši u stambenim i poslovnim zgradama predstavlja 40 % ukupnog utroška energije u Evropi [EU 01]. Kako bi se to umanjilo, jedan od ciljeva koje je postavila Evropska unija jeste da se poboljšaju energetske performanse postojećih zgrada i da do 2018. Postane obavezno projektovanje energetske efikasne zgrade u javnom sektoru, a da do 2020. to počne da važi za sve nove građevine [EU 10, EU 04]. Stoga se smanjenje emisije energije i uticaja na životnu sredinu nalaze među ključnim merama u cilju efikasnog korišćenja energije i smanjenja emisije gasova koji dovode do efekta staklene bašte, i predstavljaju bitan korak u ostvarenju Kjoto protokola [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 energetske performansi zgrada [Asd 13, DeL 15, Eva 14], performansi u toku čitavog životnog veka objekata [Ram 10] i njihovog uticaja na okolinu [13], kao i mogućnostima unapređenja energetske performansi postojećih i istorijskih objekata [Pag 15, Mur 13, Aro 15, Mur 15].

U kontekstu održivog razvoja, osnovni cilj optimizacije u projektovanju jeste smanjenje potrošnje energije i uticaja na životnu sredinu po prihvatljivom ukupnom iznosu troškova ne samo izgradnje nego i tokom čitavog životnog ciklusa objekta. Ova dva cilja često su u koliziji, budući da visoka energetska efikasnost obično iziskuje skuplje materijale i opremu. Stoga za ovaj problem ne postoji jedinstveno „najbolje“ rešenje, nego čitav niz potencijalnih rešenja između kojih projektant ili investitor treba da odabere ono koje će predstavljati zadovoljavajuć kompromis između ekoloških i ekonomskih aspekata.

Tokom izrade idejnog projekta zgrade, razvijaju se, razmatraju i evaluiraju različita alternativna rešenja kako bi se izbor suzio na nekoliko potencijalno najboljih [Men 01, Mil 01]. Promenama i rekombinovanjem različitih karakteristika i parametara

konstrukcije, kao što su oblik, položaj i struktura zidova, može postići smanjenje potrošnje energije čak i do 40 % [Bak 00, Cof 99].

Analiza životnog ciklusa (*Life Cycle Analysis*, LCA) predstavlja još jedan bitan segment u projektovanju energetski efikasnih zgrada. Ugrađena energija predstavlja veliki deo ukupne energije životnog ciklusa zgrade, u nekim slučajevima čak i do 30–60 % [Gus 10, Dod 11], a ima i veliki udeo u ukupnoj emisiji gasova tokom životnog ciklusa zgrade [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 uključiti je na adekvatan način u postupak optimizacije konstruktivnih elemenata i opreme.

Složenost ovog problema i veliki broj različitih karakteristika objekta i pozicionih i strukturnih parametara konstrukcije koje treba razmotriti uključujući ih u proračun kao promenljive navodi na zaključak da je tradicionalni pristup putem probanja neadekvatan za rešavanje ovog teškog kombinatornog problema [Sha 96] i da je zato preporučljivo rešavanje primenom odgovarajuće tehnike višekriterijumske optimizacije.

Za razliku od jednokriterijumske optimizacije, gde se traži jedinstveno optimalno rešenje problema, cilj višekriterijumske optimizacije jeste da se dođe do čitavog niza „zadovoljavajućih“ rešenja, poznatih i kao Pareto rešenja. Na taj način projektant ili donosilac odluke može da razmatranjem mogućih alternativa, ograničenja, praktičnih i arhitektonskih zahteva i ekonomskog aspekta različitih rešenja, odabere ono rešenje koje mu u datim okolnostima najviše odgovara.

Tokom poslednjih nekoliko decenija, pojavile su se mnoge metode višekriterijumske optimizacije insirisane različitim prirodnim procesima, poznate kao evolucionarni algoritmi, među kojima su najpoznatiji genetski algoritmi [Gol 98, Mit 98, Raj 92, Kav 04], simulirano kaljenje [Ben 95, Lei 99, Lam 08], optimizacija kolonijom mrava [Cam 04, Ser 06], optimizacija rojem čestica [Li 07, Per 07], harmonijska pretraga [Lee 04, Sak 09, Sak 09] i algoritam Veliki prasak – veliko sažimanje [Ero 06]. Sve ove metaheuristike dale su dobre rezultate u rešavanju različitih problema

višekriterijumske optimizacije, ponajviše zahvaljujući činjenici da se svaka iteracija proračuna obavlja na celoj populaciji, tj. na čitavom nizu alternativnih rešenja rešenja istovremeno.

Svaki populacioni algoritam treba da zadovolji dva osnovna zahteva, a to su eksploracija i eksploatacija prostora pretrage, tj. oblasti definisanosti [Lic 13], pri čemu se eksploracija odnosi na sposobnost algoritma da pretraži sve regije oblasti definisanosti, dok se eksploatacija odnosi na sposobnost pretraživanja okoline već obrađenih tačaka a da ne dođe do „zaglavljivanja“ u lokalnom optimumu. Da bi bio uspešan, algoritam pretrage treba da ostvari dobru ravnotežu između eksploracije i eksploatacije [Lin 11]. Iako su genetski algoritmi dali odlične rezultate u rešavanju problema optimalnog dimenzionisanja konstrukcija [Mil 13] i energetski efikasnih zgrada [Cal 03, Wri 01, Wan 06], uočeno je da oni iziskuju mnogo vremena za proračun, čak i do trideset časova [Wan 05, Fla 12]. S druge strane, algoritam Veliki prasak – veliko sažimanje, koji su osmislili Erol i Eksin [Ero 06], ima iste prednosti kao genetski algoritmi u pogledu primenljivosti na širok spektar problema, kombinovanja diskretnih i kontinualnih promenljivih, nepostojanja ograničenja po pitanju definisanosti oblasti pretrage, ali konvergira mnogo brže nego genetski algoritam, a daje jednako dobra ili bolja rešenja [Kav 09].

Tokom svih faza procesa projektovanja građevinskih objekata, od idejnog rešenja do izvođačkog projekta, projektant neprestano mora da donosi odluke o odgovarajućem ili najboljem izboru različitih svojstava konstrukcije, kao što su nosivost, krutost, upotrebljivost, izvodljivost i estetski aspekti. Drugim rečima, čitav proces projektovanja može se u načelu posmatrati kao optimizacija konstrukcije, čak i kad se optimalnost ne razmatra kao eksplicitno matematički problem.

U užem smislu reči, 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 umesto cene kao kriterijum

optimalnosti usvaja težina konstrukcije, budući da su te dve veličine obično usko povezane.

Međutim, ma koliko ekonomski aspekt konstrukcije bio važan, 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 svrsishodnost. 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.

Pored kvalitetne matematičke formulacije problema, za uspeh u pronalaženju optimalnog rešenja od suštinske je važnosti i adekvatan izbor tehnike rešavanja. Volpert i Makredi [Wol 97] su dokazom svoje teoreme poznate pod nazivom „Nema besplatnog ručka“ pokazali da će u poređenju rezultata dvaju različitih algoritama na većem broju problema njihova uspešnost biti u proseku ista, iako će se na pojedinačnim primerima drastično razlikovati. Drugim rečima, ne postoji najbolji, univerzalni algoritam, a metode koje su dobre za jednu klasu problema mogu se pokazati kao gotovo potpuno neupotrebljive za drugu. Upravo zato u operacionim istraživanjima i postoji veliki broj različitih metoda optimizacije.

Predmet istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji bilo je formulisanje metodologije izbora odgovarajućeg algoritma za optimalan izbor konstruktivnih i pratećih elemenata zelenih zgrada.

1.2 Obrazloženje o potrebama istraživanja

U građevinarstvu se pojam optimalnosti nije univerzalna kategorija i bitno se menja u zavisnosti od toga da li se razmatra s teorijskog ili praktičnog stanovišta, jer su rešenja koja su teorijski zadovoljavajuća često teško izvodljiva ili čak potpuno neprimenljiva u stvarnim uslovima. Zato se u projektantskoj praksi još uvek koriste grube aproksimacije i iskusvena pravila, bez dubljeg bavljenja mogućnošću uštede materijala primenom odgovarajućih optimizacionih metoda. Stoga je neophodno razviti metodološki pristup koji će omogućiti implementaciju najnovijih naučnih dostignuća u praksi time što neće biti zasnovan samo na teorijskim pretpostavkama, nego i na stvarnim potrebama i mogućnosti u domenu ostvarljivosti i opravdanosti rešenja.

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 kontradiktorna i u koliziji, zato što elementi i oprema koji povećavaju energetska 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.

Pri ovome treba imati u vidu da ovaj zadatak, u matematičkom smislu, ima veoma veliki broj promenljivih, među kojima su: izbor materijala za pojedine delove konstrukcije, izbor tipa konstrukcije i njenih geometrijskih karakteristika, orijentacija 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 velik izbor 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 okviru čitavog objekta. Primera radi, orijentacija objektu u prostoru direktno

utiče na tip i veličinu prozora na pojedinim zidovima, kao i na temeperaturu 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. 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.

Osnovni problem u optimizaciji energetski efikasnih zgrada jeste izbor adekvatne metode optimizacije, tj. proračunskog proračunskog algoritma kojim će moći da se uzmu u obzir sve promenljive, ograničenja i zahtevi, a da se kao rezultat dobije zadovoljavajući skup potencijalnih rešenja. Da bi se to sprovelo u delo, neophodno je isti zadatak rešavati primenom različitih metoda i potom proceniti koja daje najkompletnije rešenje, što je analitički moguće jedino ako se uspostave jasni kriterijumi optimalnosti i precizno formulisana merila za poređenje rezultata dobijenih različitim algoritmima pretrage oblasti mogućih rešenja. Jasno definisana metodologija odabira predstavljala bi korak napred u potpunoj automatizaciji u projektovanju energetski efikasnih zgrada i predstavljala bi koristan alat, ne samo na teorijskom nivou, nego i u praksi.

1.3 Cilj istraživanja

Istraživanje prikazano u ovoj disertaciji imalo je za cilj da se razvije metodologija poređenja efikasnosti i efektivnosti različitih metoda višekriterijumske optimizacije u rešavanju problema optimalnog projektovanja energetski efikasnih zgrada. Da bi se to ostvarilo, neophodno je formulirati adekvatne kriterijume evaluacije i poređenja rezultata dobijenih različitim optimizacijskim algoritmima, a zatim ih egzaktno formulirati primenom matematičke logike kako bi se poređenje moglo obaviti primenom računara. Na taj način bi se uticaj korisnika na rad programa (subjektivan ljudski faktor) sveo na minimum, što bi omogućilo potpunu automatizaciju procesa.

1.4 Primenjena metodologija

Istraživanje se u metodološkom smislu temelji na metodama savremene nauke. Na osnovu analize dostupne literature dat je prikaz novih dostignuća u polju projektovanja zelenih zgrada i matematičkih metoda numeričke višekriterijumske optimizacije koje se primenjuju u građevinarstvu.

Primenom indukcije i dedukcije uspostavljeni su kriterijumi koje treba da zadovolji metoda traženja rešenja u problemu višekriterijumske optimizacije. Primenom matematičke logike formulirani su merodavni kriterijumi za poređenje efikasnosti višekriterijumskih heuristika kako bi se razvila metodologija izbora najpodesnije metode proračuna za dati problem.

Predloženi pristup je potom testiran primenom analize osetljivosti na primeru određivanja optimalne kombinacije konstrukcionih parametara zelene zgrade, a to su: položaj u prostoru, oblik osnove, izbor tipa prozora i koeficijenta zastakljenosti zidova, izvor izolacije u zidovima i na krovu. Na istom primeru prikazana je i analiza dobijenih rezultata sa tehno-ekonomske tačke gledišta, odnosno na način na koji se to obavlja u realnim uslovima, tj. u praksi.

1.5 Rezultati istraživanja i njihova primenljivost

U poglavlju 3.5 data je studija slučaja u kojoj je detaljnom analizom postojeće literature iz oblasti optimalnog projektovanja armiranobetonskih konstrukcija pokazano da u građevinarstvu pojam optimalnog nije apsolutna, matematički samerljiva kategorija, i da ono što je optimalno u ekonomskom smislu (najjeftinije) ne mora biti najpodobnije i u praksi, što znači da se optimalnost konstrukcije mora sagledavati globalno, uzimajući u obzir i proces izgradnje i uslove u eksploataciji. Ovo je naročito izraženo kod energetski efikasnih objekata, kod kojih se pri projektovanju mora imati u vidu ne samo cena konstrukcije i opreme, nego i uticaj na životnu sredinu tokom izgradnje, kao i tokom čitavog životnog veka zgrade.

U numeričkom primeru u poglavlju 4.5 prikazana je uporedna analiza i analiza osetljivosti pet različitih metoda višekriterijumske optimizacije kako bi se pokazalo da pri rešavanju složenih kombinatornih problema kao što je pozicioniranje, oblikovanje i osmišljavanje energetski efikasne zgrade treba voditi računa i pri odabiru metode optimizacije, budući da nisu svi algoritmi jednako efikasni i delotvorni. Primenom Ciclerovih kriterijuma za evaluaciju kvaliteta Pareto fronta dobijena je metodologija za odabir najpovoljnije metode za rešavanje datog tipa problema, pri čemu je pokazano kako se hibridizacijom različitih metoda optimizacije mogu poboljšati njihove performanse. Ova metodologija može se uspešno primeniti i za druge tipove problema višekriterijumske optimizacije u okviru operacionih istraživanja.

Na kraju poglavlja 4.5 pokazano je kako se tumači dobijeni Pareto front, odnosno kako se na osnovu dobijenih rezultata mogu odrediti uopštene empirijske međuzavisnosti između raznorodnih promenljivih, koje je inače nemoguće uspostaviti i formulisati matematičkim putem. Na ovaj način se dobijaju smernice na osnovu kojih se u praksi mogu ostvariti tehnički zadovoljavajuća rešenja po nižoj ceni, čime se mogu ostvariti značajne uštede.

1.6 Kratak sadržaj rada

Rad se sastoji od šest poglavlja. U drugom poglavlju objašnjena je važnost održive gradnje i dati su osnovni pojmovi i načela projektovanja i sertifikacije zelenih zgrada. Teće poglavlje je vezano za optimizaciju, kako u matematičkom tako i u praktičnom smislu, s posebnim osvrtom na pojam optimalnog u građevinarstvu i optimizaciju u funkciji održivog razvoja i održive gradnje. U četvrtom poglavlju je opisana metodologija za izbor i poređenje različitih metoda višekriterijumske optimizacije u cilju nalaženja najpodesnije za rešavanje datog problema i na numeričkom primeru iz oblasti optimalnog projektovanja energetski efikasnih zgrada pokazano je kako se analitički vrši odabir odgovarajuće metode i kako se tumači Pareto front kao rezultat višekriterijumske optimizacije. U petom poglavlju data su zaključna razmatranja, a spisak korišćene literature u šestom.

2. Zelena gradnja

2.1 Uvodna razmatranja

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.

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 uslovljavaju uvođenje kontrole kvaliteta, efikasnije poslovanje, racionalnije korišćenje prirodnih resursa i očuvanje životne sredine.

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 isplativiji, 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.

2.2 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 trvenja 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).

2.2.1 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 eksploatacije 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 postignutim 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.

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 energetske prihvatljivija oprema, energetske efikasni sistemi za grejanje, provetravanje 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, toplotni 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 ohrabрили da koriste alternativne vidove prevoza i izbegli opcije koje imaju naveći negativan uticaj na životnu 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 rashlađivanje, 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].

2.2.2 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 *Accredited 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 šest 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 dotle 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 svetlom, kontrolu efekta toplotnog 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 zgradi i oko nje 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 postiče širok spektar strategija za uštedu energije, kao što su odgovorno projektovanje, primena energetski efikasnih rešenja, upotreba „čistih“ energija i obnovljivih izvora energije, proizvodnja enenergije na samoj lokaciji i tsl.

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, promovise 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*). Agencija 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 promovira 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 podnosilac, 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 navise. Maksimalan broj poena je 100 + 10 [Pav 12a].

2.2.3 HQE šema sertifikacije

Certivéa je ogranak 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 interese 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 ravnopravno 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 promovisu *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 prijatnog 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

moćnost 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 sanitarne 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].

2.2.4 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 nivoe 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 modernizacije i rekonstrukcije i bilo da su u pitanju pojedinačni objekti ili celokupni okruzi, sistem sertifikovanja pokriva sve glavne aspekte održivih objekata. Podeljen je na: životnu sredinu, ekonomiju, socio-kulturni i funkcionalni aspekt, tehnologiju, proizvodni proces i lokaciju gradilišta objekta. Procene prve četiri oblasti imaju podjednaku težinu u okviru DGNB standarda. Principi održivosti nekog objekta jednako su vredni kao ekonomska 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 podeljenih 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 aspekt. Druge dve kategorije su kvalitet procesa, 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.

Ekološki kvalitet tiče se potencijala globalnog zagrevanja, uništavanja ozonskog omotača, potencijala fotohemijskog stvaranja ozona, acidifikacije, odnosno potencijalnog rizika nezgoda sa kiselinama, eutrofikacije, tj. organskog zagađenja, rizika po lokalnu životnu sredinu, održive upotrebe resursa, mikroklimе, 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 konkurenciju, 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, integrisano 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 mikrookruženju, 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 arhitekta 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 raspolaganju 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 naponi da se tada objekat preobrati u ekološki i energetske 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 proizvoda [Uze 12b].

2.3 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 segmentima do samog završetka. Pri tome je važno da projektni zadatak ne odstupa od propisanih standarda kvaliteta. Upravljanje kvalitetom projekta u načelu predstavlja jednu od faza odnosno podprocesa upravljanja projektom. Integrisani 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 efektivnim korišćenjem dostupnih resursa. To obuhvata planiranje, organizovanje, vodjenje, kontrolisanje organizacije da se postigne određeni 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 integrisani 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 funkcionisala, ona mora da identifikuje, 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 potrebnoj 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 zadataka“, 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 integrisani 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, definišaće 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. Sektorima 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.

2.4 Projektovanje zelenih zgrada

Objavljivanje podzakonskih akata vezanih za termičke karakteristike zgrada i izdavanje sertifikata o njihovoj energetskej efikasnosti, popularno nazvanih zelenim pasošima, izazvalo je burne polemike. Donošenjem ovih pravilnika, otvorila 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 medjusobno 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 projekatanta koji učestvuju u procesu. Termin koji je danas usvojen da definiše ovakvu komunikaciju i projektantski pristup je integralno ili integrisano 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 izmedju različitih projektnih timova, ali i projekatanta i izvodjača, odnosno po završetku projekta, pristup pouzdanim informacijama za one koji održavaju objekat (KGH sistemi, vodovod i kanalizacija, itd.)

2.5 Prioriteti u projektovanju zelenih zgrada

2.5.1 Ispitivanje pretpostavki

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.

2.5.2 Korišćenje integrisanog procesa projektovanja

Integrisano projektovanje je srce zelene zgrade, i ono ne samo da vodi do bolje zgrade već i smanjuje troškove izvođenja. Za najveći broj projekatana, on treba da bude obavezan deo procesa nastanka jedne zgrade. Najveća pomoć u procesu projektovanja pruža BIM.

2.5.3 Prelaženje granice zadatog

Stručnjaci se slažu da su potrebne korenite promene u načinu na koji se projektju i izvode zgrade. Današnji stav nije da se samo smanji energija na godišnjem nivou, već se mora i agresivno nastupiti u vezi sa vodom, opasnim hemikalijama, upotrebom zemljišta itd. Inovacija u projektovanju je kategorija koja podrazumeva korišćenje inovativnih građevinskih tehnologija iz najboljih primera u praksi. U to se ubrajaju, na primer, tehnološke ideje za redukciju potrošnje vode više od standardizovanog zahteva od 40%, količine građevinskog otpada više od 75% ili tehnologije koje omogućavaju više od 75% dnevnog osvetljenja. Cilj posebnog vrednovanja novih ideja je da sadašnje inovacije u budućnosti postanu standard.

2.5.4 Uključivanje osnovne 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 visokoeffikasnih rešenja.

2.5.5 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.

2.5.6 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. Arhitekta treba da poznaju različite sertifikate, a ako neko nema sertifikat, arhitekta daju ocenu prema transparentnosti (proizvođač treba da objasni šta sadrži taj proizvod, odakle potiču sirovine i sl).

2.5.7 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 vetra. 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.

2.5.8 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.

2.5.9 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.

2.5.10 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 sensorima za CO₂ i efikasnim vazдушnim 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.

2.5.11 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.

2.5.12 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 podvrgnuta 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. Optimalno projektovanje

3.1 Uvodna razmatranja

Tokom svih faza procesa projektovanja građevinskih objekata, od idejnog rešenja do izvođačkog projekta, projektant neprestano mora da donosi odluke o odgovarajućem ili najboljem izboru različitih svojstava konstrukcije, kao što su nosivost, krutost, upotrebljivost, izvodljivost i estetski aspekti. Drugim rečima, čitav proces projektovanja može se u načelu posmatrati kao optimizacija konstrukcije, čak i kad se optimalnost ne razmatra kao eksplicitno matematički problem. Postupak rešavanja problema optimizacije sastoji se iz pet faza:

- Formulacija problema
- Izrada matematičkog modela
- Određivanje rešenja
- Provera modela i ocena validnosti rešenja
- Primena rešenja u praksi

Formulacija problema je polazni korak u kome se moraju tačno opisati ciljevi istraživanja, formulirati hipoteze, identifikovati alternativne odluke i sagledati sva ograničenja. Jasna formulacija problema predstavlja preduslov za njegovo uspešno struktuiranje i izradu efikasnog matematičkog modela.

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.

Provera matematičkog modela sprovodi se analizom osetljivosti i uporednom analizom. U analizi osetljivosti, problem se rešava više puta sa različitim ulaznim parametrima, ili se rešavaju različite varijante istog ili sličnih problema, da bi se utvrdilo da li je i koliko dati pristup tačan. Uporedna analiza sprovodi se rešavanjem drugih problema za koje su poznata rešenja, poređenjem dobijenih rezultata sa rešenjima dobijenim drugim metodama (ukoliko postoje), sa podacima dobijenim

eksperimentalnim putem ili na osnovu podataka prikupljenih iz relevantne naučne i stručne literature. Primena rešenja u praksi predstavlja poslednju fazu i verifikaciju izvršenog istraživanja, čime ono dobija svoj pravi smisao. Ukoliko istraživanje nema mogućnost praktične primene ili ne predstavlja polaznu tačku za nova i naprednija istraživanja, ono će biti neupotrebljivo, a nauka postaje sama sebi cilj. Ovo je naročito izraženo na polju tehnike, gde zadaci optimizacije nisu apstraktni, nego su proistekli iz realnih problema iz prakse. Stoga njihovom rešavanju ne treba pristupati samo matematički, nego i sa praktičnog stanovišta, što podrazumeva da se u formulaciju matematičkog modela uključe i kriterijumi izvodljivosti ili primenljivosti potencijalnih rešenja u stvarnim uslovima.

U užem smislu reči, 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 umesto cene kao kriterijum optimalnosti usvaja težina konstrukcije, budući da su te dve veličine obično usko povezane.

Međutim, ma koliko ekonomski aspekt konstrukcije bio važan, 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 svrsishodnost. 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.

3.2 Istorijski razvoj

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 linearnog 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, pojavom 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 formiranju 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 popravljaju 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.

Budući da detaljan pregled daljeg razvoja metodologije optimalnog projektovanja prevazilazi obim jedne disertacije (u knjizi prof. Osakija iz 2011. ima više od šest stotina referenci [Ohs 11]), u nastavku teksta razmatraće se samo radovi koji su direktno vezani za projektantski pristup optimizaciji. Pored navedene knjige, više podataka o razvoju savremenih metoda optimizacije u projektovanju može se pronaći u [Haf 90, Ade 94, Bur 02, Aro 02, Aro 04, Aro 07].

3.3 Formulacija i klasifikacija problema

Budući da su se tehnike optimalnog projektovanja konstrukcija razvijale uporedo 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) 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].

b) 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 tsl. Najviše radova na ovu 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].

c) 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 ispuni [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:

c.1) Diskretizovane konstrukcije su nosači kod kojih su svojstva poprečnog preseka različitih štapova međusobno nezavisna, tako da se svaki razmatra (dimenzioniše) 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 preseki štapova usvajaju iz kataloga raspoloživih profila, o čemu je već bilo reči.

c.2) Kontinualne konstrukcije se moraju posmatrati u celini, 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].

d) Topografska optimizacija se odnosi na nalaženje najpovoljnijeg oblika ljuski, 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].

3.4 Matematički model

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:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

tako da budu ispunjeni uslovi ograničenja:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = 1, \dots, p \quad (3.2)$$

$$h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, \dots, q \quad (3.3)$$

$$x_i^d \leq x_i \leq x_i^g, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

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

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (3.5)$$

Pri tom, promenljive x_i moraju da ispune 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:

$$y = (f_1(x), \dots, f_m(x)) \quad (3.6)$$

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 oplata (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:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (V_i P_b + W_i P_a + A_i P_o) \quad (3.7)$$

gde je N broj različitih elemenata u nosaču, V_i zapremina i -tog elementa, W_i ukupna težina armature, A_i površina oplata, a P_b , P_a i P_o su jedinične cene betona, armature i oplata 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 presezi 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 (3.2–3.4) 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 geometrijskih 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 rešavaju determinističkim metodama, nego stohastičkim, zasnovanim na pretraživanju skupa dopustivih rešenja u potrazi za najboljim. Dodatnu otežavajuću okolnost predstavlja činjenica da funkcije cilja 3.7 i 3.8 daju samo ekonomski aspekt problema, ali ne sadrže u sebi nikakvu informaciju o izvodljivosti konstrukcije u stvarnim uslovima. Da bi matematički aparat za optimizovanje konstrukcije bio primenljiv i u realnom projektovanju, što je i osnovna svrha istraživanja u ovoj oblasti, potrebno je uključiti dodatne kriterijume u vidu novih funkcija cilja kojima će se oponašati projektantski način razmišljanja.

3.5 Pojam optimalnosti u građevinarstvu

U građevinarstvu pojam optimalnosti nije jednoznačno definisan i stoga ga treba posmatrati u kontekstu širem od matematičkog. Rešenja koja su teorijski najpovoljnija u ekonomskom smislu, vrlo često su teško izvodljiva u realnim uslovima ili su neprihvatljiva s aspekta upotrebljivosti ili estetike. Shodno tome, problem optimalnog dimenzionisanja nosača nema jedinstveno, optimalno rešenje, nego čitav niz mogućnosti koje u većoj ili manjoj meri zadovoljavaju različite, neretko suprotstavljene kriterijume. Da bi se razvila adekvatna metodologija za rešavanje ovog zadatka, neophodno je problem sagledati i sa projektantske i izvođačke strane, pošto je to jedini način da se računar „nauči“ da oponaša ljudski način razmišljanja i donošenja odluka. Osnovni nedostatak velikog broja rešenja koja se mogu naći u literaturi leži upravo u tome što je minimalna cena konstrukcije jedini kriterijum optimalnosti, tako da se kao nepovoljna odbacuju rešenja koja daju zanemarljivo (ili prihvatljivo) veću cenu ali su neuporedivo lakša za izvođenje.

Ma koji statički sistem da je u pitanju, razmatranje optimalnosti neodvojivo je od svojstava materijala, i to ne samo u fizičkomehničkom smislu, nego i u pogledu metodologije proračuna i tehnologije izvođenja konstrukcije. U slučaju armiranobetonskih konstrukcija, potpuno rešenje problema treba da sadrži dimenzije poprečnog preseka i detaljnu šemu armiranja. Međutim, ako se uzme u obzir broj različitih prečnika armature, kao i mogućnost njihovog kombinovanja i formiranja svežnjeva, jasno je da se ista površina armature može ostvariti na više različitih načina, tj. različitim šemama armiranja koje će dati istu ili približno istu nosivost posmatranog elementa. Stoga je neophodno uvesti numerički kriterijum za ocenu složenosti šeme armiranja na osnovu koga će se među prihvatljivim rešenjima odabrati ono koje je najjednostavnije za izvođenje.

Kao dopunski kriterijum za optimalnost metalnih rešetkastih konstrukcija može se usvojiti ograničenje maksimalnog broja različitih profila koji će se pojaviti u nosaču. Pri tom treba imati u vidu da je u opštem slučaju težina konstrukcije obrnuto proporcionalna broju upotrebljenih profila, tj. najmanja težina se dobija za nosač u

kome su svi štapovi različitog poprečnog preseka, dok će nosač u kome su svi štapovi isti imati mnogo veću težinu. Pogodno rešenje problema bio bi program koji će kao alternative ponuditi nosače koji se sastoje od 2, 3,... n različitih profila, tako da korisnik može sâm da nađe kompromis između težine i složenosti konstrukcije.

Još jedan aspekt optimalnosti koji treba imati u vidu iako nije direktno vezan za konstrukcije jeste optimalnost u računarskom smislu. Budući da se pri rešavanju različitih problema optimizacije podrazumeva primena računara kako bi se razmatrale stotine, pa čak i hiljade potencijalnih rešenja, pri razvoju odgovarajuće metodologije potrebno je optimizaciji pristupiti i sa programerske strane, tj. imati u vidu realne mogućnosti računara i težiti rešenjima koja neće zahtevati previše vremena ili radne memorije. To je naročito izraženo u optimalnom projektovanju konstrukcija, pošto je pri razmatranju svakog potencijalnog rešenja neophodno izvršiti statički proračun, na koji se troši čak i do 90% vremena potrebnog za tu iteraciju. Stoga pri formulaciji metodologije rešavanja problema i definisanju tipa promenljivih i uslova ograničenja treba težiti što jednostavnijim rešenjima, ili bar izbegavati nepotrebno usložnjavanje proračuna i razmatranje očigledno neprihvatljivih rešenja.

Može se zaključiti da je problem optimalnog projektovanja zapravo zadatak višekriterijumske optimizacije s ograničenjima, pri čemu odgovarajuću metodu treba odabrati tako da se ne dobije samo jedno rešenje, nego nekoliko alternativa između kojih će korisnik programa (projektant) moći da odabere onu koju smatra najpovoljnijom u datim uslovima.

3.5.1 Studija slučaja

Potruga za efikasnim i primenljivim metodom optimizacije armiranobetonskih konstrukcija nije nova tema, ali je velika većina rešenja koja se mogu naći u postojećoj naučnoj i stručnoj literaturi fokusirana na traženje konstrukcije s minimalnom težinom, iako je u procesu odlučivanja i izbora uglavnom, ako ne i uvek, cilj da se postigne minimalna cena konstrukcije. Stoga troškovi materijala i rada treba takođe da budu značajne stavke u projektovanju i gradnji armiranobetonskih konstrukcija. Osim toga,

dobijeno rešenje ne treba da bude samo matematički optimalno, nego i primenljivo u praksi, tj. u realnim uslovima na gradilištu.

Uobičajen pristup u optimalnom dimenzionisanju armiranobetonskih nosača jeste da se optimizuju dimenzije poprečnog preseka i ukupna količina armature, ali se veoma retko sprovodi podrobnija analiza detaljne šeme armiranja i realne mogućnosti ispravnog postavljanja i učvršćivanja šipki armature na gradilištu. Međutim, u stvarnosti, projekat armiranobetonske konstrukcije podrazumeva i izradu radioničkog crteža šeme armiranja, koji u sebi sadrži mnogo više podataka od dimenzija preseka i ukupne količine armature, a to su, između ostalog: prečnici šipki, broj šipki svakog primenjenog prečnika, raspored šipki u kritičnim presecima i po dužini linijskog nosača, prečnik, raspored i geometrija uzengija itd. Sve ovo ima za posledicu da su postojeća teorijska rešenja primenljiva jedino u preliminarnom proračunu, ali da nisu dovoljno primenljiva za realno projektovanje.

Razvoj metoda optimizacije na polju dimenzionisanja armiranobetonskih konstrukcija bio je usko povezan sa računskim kapacitetom trenutno postojećih računarskih sredstava. Sve dok informaciona tehnologija nije napredovala u dovoljnoj meri da podrži rešavanje veoma složenih proračunskih modela i postupaka, problem optimalnog dimenzionisanja armiranobetonskih nosača svodio se uglavnom na određivanje bazičnih promenljivih, tj. dimenzija poprečnog preseka i ukupne količine armature, dok se pitanjem rasporeda armature i izrade detaljne šeme armiranja za dati nosač takoreći niko nije bavio [Ste 03]. Friel [Fri 74] je izveo jednačinu za određivanje optimalnog odnosa armature za jednostruko armiranu betonsku gredu zadatih dimenzija, dok je Chou [Cho 77] upotrebio metod Lagranžovih multiplikatora u cilju minimizacije ukupne cene armiranobetonske grede T preseka. Kirsch [Kir 83] je predložio iterativni postupak za trostepenu optimizaciju kontinualnog linijskog nosača pravouganog poprečnog preseka, u kome se u prvom koraku minimizuje ukupna količina armature, u drugom se minimizuju dimenzije poprečnog preseka, a u trećem se minimizuju merodavni proračunski momenti. Lakshmanan and Parameswaran [Lak 85] izveli su jednačinu za direktno određivanje optimalnog odnosa raspona nosača i efektivne visine preseka u cilju izbegavanja iterativnog postupka probanjem, dok je Prakash [Pra 88] bazirao svoj metod minimizacije cene nosača na Langranžovom i simpleks metodu.

Kanagasundaram i Karihaloo [Kan 91a, Kan 91b] uveli su nosivost preseka kao dodatnu promenljivu uz dimenzije i procenat armiranja kako bi otimizovali cenu koštanja proste grede i kontualnog nosača pravougaonog i T preseka primenom sekvencijalnog linearnog i konveksnog programiranja. Chakrabarty [Cha 92a, Cha 92b] je predložio metodologiju optimizacije cene nosača primenom geometrojskog programiranja i Newton-Rapsonove metode, dok su Al-salloum i Siddiqi [ALS 94] predložili tehniku optimizacije jednostruko armirane betonske proste grede pravougaonog poprečnog preseka primenom parcijalnog izvoda Lagranžove funkcije po ukupnoj količini armature kao promenljivoj. Coello je [Coe 97] predložio metod optimizacije cene jednostruko armirane betonske grede pravougaonog preseka primenom genetskog algoritma, gde su za nepoznate uzete dimenzije poprečnog preseka i ukupna količina armature. Detaljniji pregled literature iz ove oblasti do 1998. godine može se naći u [Sar 98].

Dalji razvoj informacione tehnologije omogućio je istraživačima da razviju inovativne metode dimenzionisanja kod kojih se aspekt optimizacije mnogo više i dublje razmatra, uz uključenje realnih zahteva i uslova ograničenja u proračun, kao i novih, realnijih kriterijuma optimalnosti.

Jedan od prvih radova koji se detaljnije bavi detaljnim planom armiranja objavili su Koumoussis i Arsenis [Kou 98]. Njihov metod se zasniva na višekriterijumskoj optimizaciji primenom genetskog algoritma u cilju iznalaženja kompromisa između minimalne cene, maksimalne uniformnosti preseka i minimalnog broja šipki armature u grupama istih ili sličnih preseka. Tek nakon toga istraživači su počeli da uključuju pojedinosti vezane za šemu armiranja kao promenljive u različitim tehnikama optimizacije, najčešće koristeći jedan od dva uobičajena pristupa. U prvom se minimalna i maksimalna rastojanja između šipki uključuju u proračun kao ograničenja, [Alq 11, Kav 11, Bar 12, Bek 12], dok se u drugom pristupu unapred formira baza mogućih šema armiranja [Gov 05, Gov 07, Jah 13, You 12]. U prvom prisutpu su ograničenja data u vidu maksimalnog broja redova armature (obično jedan ili dva) i maksimalan dopušten broj šipki u jednom redu (obično četiri do pet). Drugi pristup je zapravo pojednostavljena verzija prvog, pošto se baza mogućih poprečnih preseka i šema armiranja razvija na osnovu istih uslova propisanih odgovarajućim

pravilnikom. U svega nekoliko radova, kao što je, na primer, [Mil 13], date su metode optimizacije u kojima nema unapred zadatih ograničenja u cilju pojednostavljenja proračuna, nego se dimenzionisanje obavlja samo u skladu s važećim pravilnikom.

Iz navedenog se može zaključiti da je jedan od osnovnih problema u izradi univerzalno primenljive metode optimizacije zapravo činjenica da se svaka od navedenih metoda zasniva na drugačijem pravilniku (u zavisnosti od zemlje iz koje su autori), tako da se uslovi ograničenja i pravila za armiranje mogu bitno razlikovati. Upravo zbog toga, u ovoj oblasti ne postoje standardni matematički problemi za testiranje metoda optimizacije, za razliku od metalnih konstrukcija, gde postoji obilje takvih zadataka i njihovih rešenja. Stoga se u slučaju armiranobetonskih konstrukcija procena primenljivosti metoda može vršiti jedino na osnovu parametarske analize osetljivosti.

Prva promenljiva koja se razmatra u optimalnom dimenzionisanju konstrukcija jeste oblik poprečnog preseka konstruktivnih elemenata kojim će se postići najpovoljnija raspodela napona u nosaču. Kako bi se pri tom težilo što većoj unifikaciji nosača u okviru čitave konstrukcije (zbog lakše i brže izrade i ugradnje), poprečni preseki se obično odabiraju u relativno malom opsegu izvodljivih ili mogućih oblika rešenja. Nakon donošenja odluke o obliku i dimenzijama poprečnih preseka, pristupa se rešavanju drugog i mnogo složenijeg zadatka optimizacije, a to je usvajanje prečnika šipki armature i njihovo razmeštanje u presecima merodavnim za dimenzionisanje (kritičnim presecima), što se u praksi obično naziva plan armature. S optimizacione tačke gledišta, ovaj zadatak pripada domenu topološke optimizacije, budući da se u njemu određuju broj i prečnici šipki armature i njihov prostorni raspored. Računska složenost matematičkog aparata za rešavanje problema zavisi od izbora i tipa parametrizacije promenljivih i uslova ograničenja.

Ukoliko se pri optimalnom dimenzionisanju armiranobetonskog nosača kao optimizacioni kriterijum usvoji konačna cena nosača, funkcija cilja može se definisati kao:

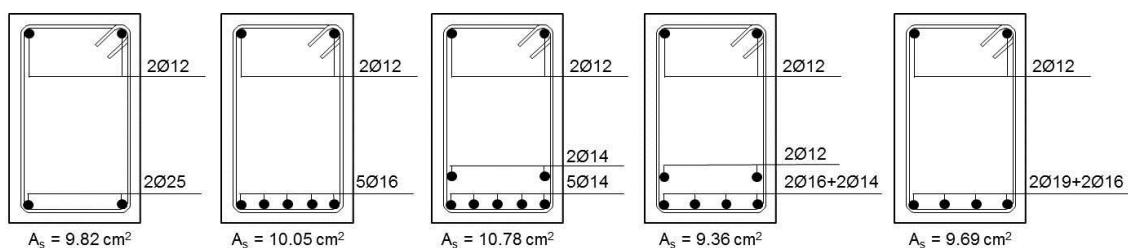
$$F_{(x)} = V_c P_c + W_s P_s + A_f P_f \quad (3.9)$$

gde je V_c ukupna zapremina upotrebljenog betona, W_s je ukupna težina ugrađene armature, A_f je ukupna površina potrebne oplata, a P_c , P_s i P_f su jedinične cene betona po m^3 , čelika po kg i oplata po m^2 , respektivno, pti čemu treba imati u vidu da to nisu samo nabavne cene materijala, nego da su u njih uključeni i troškovi obrade i ugradnje.

Kako su geometrija konstrukcije (rasponi i položaj i tip oslonaca), svojstva i cene materijala, kao i opterećenja (osim sopstvene težine) već unapred definisani projektom, promenljive u ovakvoj formulaciji zadatka optimizacije biće dimenzije poprečnog preseka. U ovoj fazi proračuna nije nužno baviti se pojedinostima šeme armiranja, pošto se ukupna količina armature u merodavnim presecima može sračunati na osnovu zahteva datih u odgovarajućem pravilniku. S druge strane, ovaj aspekt proračuna ne može se u potpunosti zanemariti, budući da konačno rešenje problema ipak treba u sebi da sadrži podatke kao što su prečnici i pozicije šipki armature, što može predstavljati veoma složen problem ako se ima u vidu veliki broj različitih mogućih rasporeda šipki, kao i mogućnosti kombinovanja šipki različitih prečnika i njihovog povezivanja u snopove sačinjene od istih ili različitih šipki. Takođe treba napomenuti da se, iako se pravilnici u raznim zemljama razlikuju u većoj ili manjoj meri, ograničenja i zahteva po pitanju rasporeda armature uglavnom svode na isto, pošto ono što je u jednoj zemlji propisano pravilnikom obično u drugoj usvojeno kao iskustveno pravilo i obrnuto.

Osnovni problem u svim ranije navedenim metodama optimizacije jeste usvajanje detaljnog plana armature, tj. raspoređivanje proračunski dobijene potrebne armature uz dovoljnu količinu geometrijskih podataka na osnovu kojih će dobijeni plan armiranja biti primenljiv na gradilištu. Ako se ima u vidu broj različitih prečnika šipki koje projektant ima na raspolaganju, ovaj zadatak nije toliko jednostavan kao što se obično misli. S druge strane, upravo zbog tog izobilja mogućnosti, nameće se zaključak da je za svaku računski dobijenu površinu armature i statičku vidinu preseka moguće pronaći veći broj odgovarajućih i jednako dobrih (u matematičkom smislu) šema armiranja. Problem se dodatno usložnjava ako se u analizi mogućih šema armiranja u obzir uzmu i šeme koje se sastoje od šipki različitih preseka i/ili snopovi od dve, tri ili četiri iste ili različite šipke.

Ovaj široki dijapazon mogućih rešenja stavlja projektanta pred nekoliko novih problema. Prvi i najočigledniji jeste kako napraviti sve moguće validne šeme armiranja. Složenost ovog problema može se ilustrovati jednostavnim primerom prikazanim na slici XXX.1. Za dati pravougaoni armiranobetonski presek dimenzija $b/d = 25/35$ cm, sračunato je da minimalna dopuštena površina armature može da bude 9.30 cm^2 (uz dopušteno podmerenje od 5%). Sve prikazane šeme armiranja teorijski su prihvatljive, ali će se računar uvek opredeliti za treću (9.36 cm^2), kao najpribližniju zadatoj granici, dok će iskusan projektant tu mogućnost odbaciti kao previše složenu i tešku za uzradu na gradilištu. Pri ovome treba imati u vidu da su na slici data samo rešenja koja se sastoje od pojediničnih šipki, dok bi, ako se uvede mogućnost pravljenja i kombinovanja istih ili različitih snopova, kao i kombinovanja snopova i pojedinačnih šipki, broj mogućih rešenja porastao na više od dvadeset.



Slika 3.1. Moguće šeme armiranja za $A = 9.30 \text{ cm}^2$.

Kao što je ranije rečeno, jedno od mogućih rešenja koja se mogu naći u literaturi jeste da se pri usvajanju šeme armiranja koristi prethodno razvijena baza koja u sebi sadrži sve moguće šeme armiranja za preseke različitih širina. Međutim, takve baze su uglavnom veoma uopštene i pojednostavljene, date samo u cilju ilustracije osnovnih pretpostavki datog proračunskog modela. Jedina baza koja bi se mogla smatrati dovoljno sveobuhvatnom jeste ona koju su u svojim radovima koristili Govindaraj i Ramasamy [19,20], pri čemu treba imati u vidu da čak iako ta baza pokriva vrlo ograničen opseg širina preseka (25–35 cm), u njoj ima gotovo 10.000 mogućih šema armiranja. To znači da bi za veći opseg mogućih širina preseka, npr. 20–50 cm, što su realne vrednosti u praksi, baza sadržala stotine hiljada mogućih šema armiranja. Jasno je

da bi sastavljanje takve baze bilo zametan i mukotrpan posao, a čak i kada bi ona postojala, računar bi se uvek opredelio za ono rešenje koje daje minimalnu količinu armature, ne uzimajući u obzir primenljivost tog rešenja u praksi, tj. izvodljivost u realnim uslovima na gradilištu. Za razliku od ovoga, u realnom projektovanju, inženjer bi pri izboru jednog od mnogo mogućih rešenja pokušao da postigne kompromis između matematičke tačnosti rešenja i izvodljivosti odabrane šeme armiranja na gradilištu. Stoga je preporučljivo uvesti dodatne, sekundarne kriterijume, koji bi u obzir uzeli i numerički evaluisali izvodljivost različitih šema armiranja u realnim uslovima [Mil 15].

Druga, i mnogo primenljivija mogućnost, jeste da se problem usvajanja armature razdvoji na dva odvojena i manje-više nezavisna koraka. Prvi bi bio da se odredi samo ukupna površina potrebne armature i položaj njenog težišta, što bi se obavilo u okviru odabrane metode optimizacije. Nakon određivanja optimalnog rešenja, pristupa se drugom koraku, a to je da se za sračunatu optimalnu širinu preseka i površinu armature pronade šema armiranja koja bi obezbedila zadovoljavajuću količinu čelika, s težištem na odgovarajućem mestu i za zadatu optimalnu širinu preseka. Ovakav pristup ima nekoliko prednosti, od kojih je najbitnija što on nema uticaja na tačnost proračuna, pošto se, kao što je već napomenuto ranije u tekstu, za svaku sračunatu površinu armature i položaj njenog težišta u preseku zadate širine sigurno može iznaći šema armiranja koja će sve to obezbediti. Na ovaj način smanjuje se broj promenljivih i uslova ograničenja u rešavanju problema optimizacije, što znatno povećava brzinu i efikasnost pretrage oblasti definisanosti. [Ass 16]

3.6 Optimizacija u funkciji održivosti

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 energetske 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 bašte 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 energetske performansi zgrada [Asd 13, DeL 15, Eva 14], performansi u toku celog životnog veka objekata [Ram 10] i njihovog uticaja na okolinu [13], kao i mogućnostima unapređenja energetske performansi postojećih i istorijskih objekata [Pag 15, Mur 13, Aro 15, Mur 15].

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 celog životnog ciklusa. Ova dva cilja su često kontradiktorna i u koliziji, zato što elementi i oprema koji povećavaju energetske performanse 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 performansi. Pri ovome treba imati u vidu da ovaj zadatak, u matematičkom smislu, ima veoma veliki broj promenljivih, među kojima su: izbor materijala za pojedine delove konstrukcije, izbor tipa konstrukcije i njenih geometrijskih karakteristika, orijentacija 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 izbor 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 okviru čitavog objekta. Primera radi, orijentacija objektu 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 energetske 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 energetske efikasne zgrade 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 energetske efikasne zgrade i da je zato neophodno uključiti je na adekvatan način u postupak optimizacije konstruktivnih elemenata i opreme. Stoga je LCA bitna stavka u projektovanju pasivnih i zelenih zgrade, koju je neophodno uzeti u obzir pri optimizaciji.

Složenost ovog 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.

Shodno napred navedenom, u problemu optimalnog projektovanja energetske efikasne zgrade neophodno je poći od dva cilja – jedan je minimizacija uticaja na okolinu tokom čitavog veka trajanja zgrade (LCI), a drugi minimizacija ukupnih troškova izgradnje i eksploatacije (LCC), što se uopšteno može predstaviti kao:

$$MIN: LCC_{(x)} = ICC_{(x)} + OC_{(x)} \quad (3.10)$$

$$MIN: LCI_{(x)} = EIC_{(x)} + EIO_{(x)} \quad (3.11)$$

gde je ICC cena izgradnje objekta, OC su ukupni troškovi eksploatacije tokom životnog veka objekta, EC je uticaj na okolinu tokom izgradnje, a EO je uticaj na okolinu tokom eksploatacije (usled grejanja, hlađenja, osvetljenja i sličnih procesa) [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 donosiocu odluke (projektantu ili investitoru) omogućava da razmotri različite alternative i odabere rešenje koje će predstavljati zadovoljavajući kompromis između suprotstavljenih i raznorodnih ciljeva.

3.7 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 [Coe 07]:

- apriorni pristup,
- aposteriorni pristup
- interaktivni ili kooperativni pristup.

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.

Pored kvalitetne matematičke formulacije problema, za uspeh u pronalaženju optimalnog rešenja od suštinske je važnosti i adekvatan izbor tehnike rešavanja. Volpert i Makredi [Wol 97] su dokazom svoje teoreme poznate pod nazivom „Nema besplatnog ručka“ pokazali da će u poređenju rezultata dvaju različitih algoritama na većem broju problema njihova uspešnost biti u proseku ista, iako će se na pojedinačnim primerima drastično razlikovati. Drugim rečima, ne postoji najbolji, univerzalni algoritam, a metode koje su dobre za jednu klasu problema mogu se pokazati kao gotovo potpuno

neupotrebljive za drugu. Upravo zato u operacionim istraživanjima i postoji veliki broj različitih metoda optimizacije.

Dobro strukturirani 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 strukturiranim. Između dobro i loše strukturiranih 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.

Determinističke metode se dalje mogu podeliti na analitičke i numeričke. Analitičke metode se uglavnom primenjuju za jednostavnije probleme i tada se do optimalnog rešenja se dolazi primenom matematičkih transformacija iz domena algebre, diferencijalnog i integralnog računa.

Numeričke metode se koriste mnogo češće, čak i u slučajevima kada postoji analitička formulacija problema. Rešavanje problema sprovodi se primenom odgovarajućeg algoritma, koji se sastoji od 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.

Za veoma složene probleme, za koje je teško ili nemoguće dati adekvatnu matematičku formulaciju ili ona, čak i kada postoji, nije dovoljno precizna, koriste se stohastičke metode pretraživanja koje se zasnivaju na nalaženju optimalne vrednosti funkcije cilja pretraživanjem diskretnih tačaka u skupu dopustivih rešenja, pri čemu se pravci pretraživanja određuju iz uslova ograničenja. Kod ovih metoda ne postoji garancija da je pronađeno rešenje ujedno i najbolje, nego samo dovoljno dobro u odnosu na zadate kriterijume, tako da je reč o suboptimalnom rešenju. Stoga se proračun takvim metodama sprovodi više puta, pa se, u slučaju da se dobijaju različita rešenja, usvaja najbolje.

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 uzročnopsledičnih 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.

3.7.1 Heurističke metode

Kao što je opisano u prethodnom odeljku, egzaktne metode jesu najpoželjnije, ali najčešće daju loše rezultate kada se primene na teške probleme velikih dimenzija. S druge strane, rezultati dobijeni primenom heurističkih metoda jesu nepouzdaniji, ali su one 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 metaheuristicčki 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.

3.7.2 Metaheuristike

Metaheuristicke 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 evolucionari algoritmi [Gol 89, Mic 96, Băc 95, Băc 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].

3.7.3 Evaluacija rešenja

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.

4. Evaluacija metoda i rešenja

4.1 Uvodna razmatranja

U građevinarstvu se pojam optimalnosti nije univerzalna kategorija i bitno se menja u zavisnosti od toga da li se razmatra s teorijskog ili praktičnog stanovišta, jer su rešenja koja su teorijski zadovoljavajuća često teško izvodljiva ili čak potpuno neprimenljiva u stvarnim uslovima. Zato se u projektantskoj praksi još uvek koriste grube aproksimacije i iskusvena pravila, bez dubljeg bavljenja mogućnošću uštede materijala primenom odgovarajućih optimizacionih metoda. Stoga je neophodno razviti metodološki pristup koji će omogućiti implementaciju najnovijih naučnih dostignuća u praksi time što neće biti zasnovan samo na teorijskim pretpostavkama, nego i na stvarnim potrebama i mogućnosti u domenu ostvarljivosti i opravdanosti rešenja.

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 kontradiktorna i u koliziji, zato što elementi i oprema koji povećavaju energetska 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.

Pri ovome treba imati u vidu da ovaj zadatak, u matematičkom smislu, ima veoma veliki broj promenljivih, među kojima su: izbor materijala za pojedine delove konstrukcije, izbor tipa konstrukcije i njenih geometrijskih karakteristika, orijentacija 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 izbor 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 okviru čitavog objekta. Primera radi, orijentacija objektu 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. 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.

Tokom poslednjih nekoliko decenija, pojavile su se mnoge metode višekriterijumske optimizacije insirisane različitim prirodnim procesima, poznate kao evolucionarni algoritmi, među kojima su najpoznatiji genetski algoritmi [Gol 98, Mit 98, Raj 92, Kav 04], simulirano kaljenje [Ben 95, Lei 99, Lam 08], optimizacija kolonijom mrava [Cam 04, Ser 06], optimizacija rojem čestica [Li 07, Per 07], harmonijska pretraga [Lee 04, Sak 09, Sak 09] i algoritam Veliki prasak – veliko sažimanje [Ero 06]. Sve ove metaheuristike dale su dobre rezultate u rešavanju različitih problema višekriterijumske optimizacije, ponajviše zahvaljujući činjenici da se svaka iteracija proračuna obavlja na celoj populaciji, tj. na čitavom nizu alternativnih rešenja rešenja istovremeno.

Svaki populacioni algoritam treba da zadovolji dva osnovna zahteva, a to su eksploracija i eksploatacija prostora pretrage, tj. oblasti definisanosti [Lic 13], pri čemu se eksploracija odnosi na sposobnost algoritma da pretraži sve regije oblasti

definisano, dok se eksploatacija odnosi na sposobnost pretraživanja okoline već obrađenih tačaka a da ne dođe do „zaglavlivanja“ u lokalnom optimumu. Da bi bio uspešan, algoritam pretrage treba da ostvari dobru ravnotežu između eksploracije i eksploatacije [Lin 11]. Iako su genetski algoritmi dali odlične rezultate u rešavanju problema optimalnog dimenzionisanja konstrukcija [Mil 13] i energetski efikasnih zgrada [Cal 03, Wri 01, Wan 06], uočeno je da oni iziskuju mnogo vremena za proračun, čak i do trideset časova [Wan 05, Fla 12]. S druge strane, algoritam Veliki prasak – veliko sažimanje, koji su osmislili Erol i Eksin [Ero 06], ima iste prednosti kao genetski algoritmi u pogledu primenljivosti na širok spektar problema, kombinovanja diskretnih i kontinualnih promenljivih, nepostojanja ograničenja po pitanju definisanosti oblasti pretrage, ali konvergira mnogo brže nego genetski algoritam, a daje jednako dobra ili bolja rešenja [Kav 09].

Tokom svih faza procesa projektovanja građevinskih objekata, od idejnog rešenja do izvođačkog projekta, projektant neprestano mora da donosi odluke o odgovarajućem ili najboljem izboru različitih svojstava konstrukcije, kao što su nosivost, krutost, upotrebljivost, izvodljivost i estetski aspekti. Drugim rečima, čitav proces projektovanja može se u načelu posmatrati kao optimizacija konstrukcije, čak i kad se optimalnost ne razmatra kao eksplicitno matematički problem.

U užem smislu reči, 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 umesto cene kao kriterijum optimalnosti usvaja težina konstrukcije, budući da su te dve veličine obično usko povezane.

Međutim, ma koliko ekonomski aspekt konstrukcije bio važan, 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 svrsishodnost. 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.

Pored kvalitetne matematičke formulacije problema, za uspeh u pronalaženju optimalnog rešenja od suštinske je važnosti i adekvatan izbor tehnike rešavanja. Volpert i Makredi [Wol 97] su dokazom svoje teoreme poznate pod nazivom „Nema besplatnog ručka“ pokazali da će u poređenju rezultata dvaju različitih algoritama na većem broju problema njihova uspešnost biti u proseku ista, iako će se na pojedinačnim primerima drastično razlikovati. Drugim rečima, ne postoji najbolji, univerzalni algoritam, a metode koje su dobre za jednu klasu problema mogu se pokazati kao gotovo potpuno neupotrebljive za drugu. Upravo zato u operacionim istraživanjima i postoji veliki broj različitih metoda optimizacije.

Osnovni problem u optimizaciji energetske efikasne zgrade jeste izbor adekvatne metode optimizacije, tj. proračunskog algoritma kojim će moći da se uzmu u obzir sve promenljive, ograničenja i zahtevi, a da se kao rezultat dobije zadovoljavajući skup potencijalnih rešenja. Da bi se to sprovelo u delo, neophodno je isti zadatak rešavati primenom različitih metoda i potom proceniti koja daje najkompletnije rešenje, što je analitički moguće jedino ako se uspostave jasni kriterijumi optimalnosti i precizno formulisana merila za poređenje rezultata dobijenih različitim algoritmima pretrage oblasti mogućih rešenja. Jasno definisana metodologija odabira predstavljala bi korak napred u potpunoj automatizaciji u projektovanju energetske efikasne zgrade i predstavljala bi koristan alat, ne samo na teorijskom nivou, nego i u praksi.

Predmet istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji bilo je formulisanje metodologije izbora odgovarajućeg algoritma za optimalan izbor konstruktivnih i pratećih elemenata zelenih zgrada.

4.2 Funkcije cilja

Problem optimalnog projektovanja energetski efikasne zgrade definisan je kroz dve funkcije cilja, odnosno kroz minimizaciju ukupnih troškova (LCC) i minimizaciju uticaja na okolinu (LCI) tokom izgradnje i životnog veka zgrade [Wan 05]:

$$\text{MIN: } LCC_{(x)} = ICC_{(x)} + OC_{(x)} \quad (4.1)$$

$$\text{MIN: } LCI_{(x)} = EIC_{(x)} + EIO_{(x)} \quad (4.2)$$

gde je ICC početna cena konstrukcije (\$), OC je ukupan iznos eksploatacionih troškova (\$), EC je uticaj na okolinu tokom izgradnje (MJ), a EO je uticaj na okolinu tokom eksploatacije objekta (MJ).

Promenljive koje su se razmatrale u ovom istraživanju mogu se podeliti u tri kategorije, a to su geometrijske, pozicione i konstruktivne promenljive. Geometrija zgrade definisana je njenim oblikom i dimenzijama. U prikazanom istraživanju razmatrane su samo zgrade pravougaone osnove unapred zadate spratne površine i visine, pri čemu su dimenzionalne promenljive (stranice pravougaonika a i b) objedinjene u jednu kontinualnu promenljivu (a/b) nazvanu *koeficijent oblika*. Pozicija zgrade u prostoru definisana je uglom između stranice pravougaonika a u odnosu na sever. Konstruktivne promenljive bazirane su na omotaču objekta i obuhvataju tip prozora, veličinu prozora (koeficijent zastakljenosti) za svaku od četiri fasade, tip i debljinu izolacije u zidovima i krovu, respektivno.

Svaki set vrednosti navedenih promenljivih predstavlja jedno moguće rešenje, tj. jedan potencijalni projekat zgrade. Podaci o početnim troškovima gradnje uzeti su iz *RS Means* [RSM 15], proračun temeljnog opterećenja i godišnjeg utroška energije sproveden je primenom softvera *EnergyPlus* [EP 15], a uticaj ugrađene energije i uticaja na okolinu određen je primenom softvera ATHENA.

4.3 Optimizacioni algoritmi

Problem definisan funkcijama cilja (4.1) i (4.2) očigledno je problem višekriterijumske optimizacije s konfliktnim kriterijumima, što znači da približavanje minimumu jedne funkcije podrazumeva udaljšavanje od minimuma druge. Shodno tome, ne postoji jedinstveno optimalno rešenje, nego čitav niz potencijalno zadovoljavajućih rešenja, koja se nazivaju Pareto rešenja a zajedno čine tzv Pareto front. Rešenje je Pareto optimalno ako i samo ako u prostoru pretrage ne postoji nijedno koje je dominantno u odnosu na njega. Drugim rečima, to je uređeni par vrednosti funkcija cilja kod koga je nemoguće promenom vrednosti bilo koje promenljive poboljšati vrednost jedne funkcije bez pogoršanja vrednosti druge.

Analiza celokupnog Paret fronta pruža korisne informacije o međuzavisnosti između datih funkcija cilja i omogućava donosiocu odluke da razmotri različiti alternative i odabere onu koja će predstavljati prihvatljiv kompromis u datim uslovima. Kod teških kombinatornih problema kao što je ovaj, nemoguće je pretražiti čitavu oblast definisanosti bez odgovarajuće softvereske alatke, odnosno optimizacionog algoritma.

Algoritam Veliki prasak – veliko sažimanje je relativno nov evolucionim algoritam, koji su 2006. predložili Erol i Eksin [Ero 06]. Ova metoda se pokazala efikasnijom od ostalih srodnih metoda zato što iziskuje manje vremena za proračun a ima veću brzinu konvergencije [Kav 09], što je potvrđeno testiranjem na problemima iz raznih oblasti kao što su energetske sistemi [Dei 14], fazi-inverzija [Yes 14], oblikovanje i optimizacija prostornih rešetkastih nosača [Kav 09], problem optimizacije aerodroma [Gen 09] i nelinearno modelovanje kontrolera [Dog 07].

Metod Veliki prasak – veliko sažimanje inspirisan istoimenom teorijom o postanku i evoluciji svemira. Svaka iteracija algoritma sastoji se od dve faze – Velikog praska i velikog sažimanja. U fazi Velikog praska potencijalna rešenja se nasumično „razbacuju“ po prostoru pretrage. Nasumičan izbor potencijalnih rešenja u bilo kom optimizacionom algoritmu može se posmatrati kao ekvivalent rasipanju, odnosno disipaciji energije u prirodi, dok se konvergencija ka lokalnom ili globalnom optimumu može posmatrati kao gravitaciono privlačenje.

4.3.1 Matematička formulacija

Slično drugim evolucionim algoritmima, polazna rešenja u prvom Velikom prasku dobijaju se nasumično i u manjoj ili većoj meri ravnomerno su raspoređena po celom prostoru pretrage. Zatim sledi Veliko sažimanje, kao konvergecioni operator kojim se iz čitave tako dobijene populacije rešenja određuje jedna tačka, tzv. centar mase, gde se pod terminom *masa* podrazumeva inverzna vrednost funkcije cilja [Ero 06]. Tačka određena kao centar mase za k -tu iteraciju (X_c^k) određuje se kao:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i} X_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f_i}} \quad (4.3)$$

gde je X_i tačka u n -todimenzionalnom prostoru pretrage, f_i je vrednost funkcije cilja u toj tački, a N je veličina populacije. Druga mogućnost je da se položaj centra mase ne izračunava, nego da se najbolja jedinka iz prethodne populacije proglasi centrom mase za narednu [Gen 13].

Nakon određivanja centra mase algoritam prelazi na novi Veliki prasak i formira novu generaciju potencijalnih rešenja razbacujući ih oko centra mase u skladu sa:

$$X_i^{k+1} = X_c^k + r_j \alpha \frac{X_{max} - X_{min}}{k + 1}, i = 1, \dots, N \quad (4.4)$$

Gde je k redni broj iteracije, r_j je nasumično odabran broj iz standardne normalne raspodele i različit je za svaku jedinku, α je parametar za ograničavanje veličine prostora pretrage, a X_{min} i X_{max} su vektori koji se sastoje od graničnih (najmanjih i najvećih, respektivno) dopuštenih vrednosti svih promenljivih. Nakon formiranja nove populacije, algoritam ponovo sračunava novi centar mase.

Ovo smenjivanje „eksplozija“ i „sažimanja“ nastavlja se sve dok se ne ispuni kriterijum za zaustavljanje, što može biti dostizanje maksimalnog unapred odabranog broja iteracija ili ostvarenje konvergencije.

Hibridni algoritmi

Iako se metod Veliki prasak – veliko sažimanje pokazao na mnogim primerima kao uspešniji od genetskog algoritma [Ero 06] i omogućava detaljnu pretragu u okolini lokalnih optimuma (tj. u eksploataciji), pokazalo se da ponekad ima problema u eksploraciji, odnosno u pokrivanju čitavog prostora pretrage, kao i da u nekim slučajevima dolazi do konvergencije ka lokalnom optimumu [Kav 09] umesto globalnog. U cilju poboljšanja performansi metode i prevazilaženja ovih nedostataka, u prikazanom istraživanju je ispitana mogućnost hibridizacije algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje s nekim elementima optimizacije rojem čestica, u skladu s metodologijom koju je predložio Kaveh u [Kav 09], budući da je ovaj pristup dao povoljne rezultate u različitim problemima optimizacije [Kav 09, Sed 14].

Optimizacija rojem čestica inspirisana je ponašanjem jata ptica ili riba u potrazi za hranom [Ken 01, Agh 14], tako da na „kretanje“ svake čestice ne utiče samo sopstveno iskustvo, nego i iskustvo čitavog jata. Stoga se pomeranje svake čestice u narednoj iteraciji određuje na osnovu najboljeg položaja u kome je dotle bila (lokalno najbolja vrednost) i na osnovu najboljih položaja okolnih čestica (globalno najbolje vrednosti). Ovo svojstvo je iskorišćeno za poboljšanje algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje u njegovu hibridnu verziju, u kojoj pri generisanju nove populacije ($k+1$) čestica ne koristi samo centar mase iz prethodne iteracije (X_c^k), nego i najbolji položaj date jedinke u prethodnih k iteracija ($X^{lbest(k)}$) i najbolji dotadašnji položaji ostalih čestica ($X^{gbest(k)}$) [Kav 09]:

$$X_i^{k+1} = \beta X_c^k + (1 - \beta) \left[\gamma X^{gbest(k)} + (1 - \gamma) X_i^{lbest(k)} \right] + r_j \alpha \frac{X_{max} - X_{min}}{k + 1}, i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

gde su β i γ podesivi koeficijenti za kontrolu uticaja globalno i lokalno najboljih rezultata $X^{gbest(k)}$ i $X^{lbest(k)}$, respektivno.

4.4 Evaluacija rešenja

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.

Po Cicleru, kvalitetan Pareto front treba da ima tri sledeća svojstva:

- **Preciznost** – odstojanje između nedominiranih rešenja i aproksimacije Pareto fronta treba da bude što manje;
- **Ujednačenost** – gustina raspodele rešenja duž Pareto fronta treba da bude što ujednačenija;
- **Pokrivenost** – raspon između krajnjih rešenja u Pareto frontu treba da bude što veći, tj. za svaku funkciju cilja treba da postoji što veći broj nedominiranih rešenja iz čitave oblasti definisanosti.

4.4.1 Funkcija preciznosti

Ako se zna tačno rešenje problema, tj. tačan Pareto front PF_t , tada se tačnost Pareto fronta u razmatranom rešenju PF može iskazati preko međusobnog odstojanja njihovih tačaka:

$$GD = \frac{1}{n_{pf}} \left[\sum_{i=1}^{n_{pf}} d_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

gde je n_{pf} broj tačaka u razmatranom rešenju, a d_i euklidsko odstojanje tačke i u razmatranom rešenju i njoj najbliže tačke u poznatom rešenju PF_r . Manja vrednost funkcije GD ukazuje na bolju konvergenciju.

U slučaju da tačno rešenje nije poznato, mogu se porediti rešenja dobijena različitim metodama. Ako su A i B dva različita Pareto fronta za isti problem, onda se procenat rešenja iz skupa B koja su dominirana bar jednim rešenjem iz skupa A može izraziti kao:

$$C_{(A,B)} = \frac{|\{u \in B | \exists v \in A : v \text{ dominira } u\}|}{|B|} \quad (4.7)$$

Vrednost funkcije $C_{(A,B)}$ kreće se između 0 i 1, pri čemu $C_{(A,B)}=1$ znači da su sva rešenja iz skupa B dominirana, tj. da za svako postoji bar jedno bolje u skupu A , dok $C_{(A,B)} = 0$ znači da su sva rešenja iz skupa B bolja od rešenja iz skupa A .

4.4.2 Funkcija ujednačenosti

Ako se Pareto front sastoji od n_{pf} tačaka i ako je d_i euklidsko odstojanje tačke i od njoj najbliže tačke u Pareto frontu, onda se mera ujednačenosti Pareto fronta može izraziti kao:

$$S = \left[\frac{1}{n_{pf}} \sum_{i=1}^{n_{pf}} (d_i - \bar{d})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{n_{pf}} \sum_{i=1}^{n_{pf}} d_i \quad (4.9)$$

gde manja vrednost funkcije S ukazuje na ujednačeniju raspodelu tačaka duž Pareto fronta.

4.4.3 Funkcija pokrivenosti

Ako problem ima m funkcija cilja i ako je poznato tačno ili bar dovoljno dobro rešenje tog problema u vidu Pareto fronta PF_t , tada se mera u kojoj razmatrani Pareto front PF pokriva oblast definisanosti može izraziti kao:

$$MS = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\min(f_i^{max} - F_i^{max}) - \max(f_i^{min} - F_i^{min})}{F_i^{max} - F_i^{min}} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

gde su f_i^{max} i f_i^{min} najveća i najmanja vrednost i -te funkcije cilja razmatranog Pareto fronta PF , a F_i^{max} i F_i^{min} najveća i najmanja vrednost iste te funkcije cilja u poznatom rešenju PF_t . Veća vrednost funkcije MS ukazuje na bolju pokrivenost oblasti definisanosti Pareto fronta. Ako ne postoji poznato rešenje problema PF_t , za vrednosti F_i^{max} i F_i^{min} uzimaju se najveća i najmanja vrednost i -te funkcije cilja dobijene u svim razmatranim metodama ili modelima.

4.5 Numerički primer

Postupak ispitivanja i evaluacije različitih optimizacionih algoritama biće prikazan putem testiranja na istom problemu, a to je projekat prizemne poslovne zgrade površine 1000 m^2 u Beogradu.

Za potrebe proračuna utroška energije smatra se da je grejna sezona od marta do oktobra, a da se objekat rashlađuje od juna do septembra. Dnevna temperatura unutar objekta treba da iznosi 22°C u grejnoj sezoni i 23°C tokom ostatka godine. Razmatrao se životni vek zgrade od 30 godina.

Zgrada ima fiksiranu površinu od 1000 m^2 i spratnu visinu od 3,5 m. Osnova je pravougaona, opisana odnosom stranica (a/b) kao promenljivom nazvanom *koeficijent oblika*. Prostorni položaj zgrade opisan je promenljivom *orijentacija*, koja je zapravo ugao između donje stranice pravougaonika a i severa.

U pogledu konstruktivnih karakteristika, zgrada ima armiranobetonski skelet, podnu ploču livenu na licu mesta i klasičan drveni krov pokriven crepom. 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. Krov se sastoji od pokrivača (crep), čvrste izolacije (promenljiva RI) i potkonstrukcije. Za izolaciju zidova i krova razmatrani su ekspanzirani i ekstrudirani polistiren (EPS i XPS) debljine 76 mm, 102 mm i 127 mm.

Koeficijent zastakljenosti za svaku fasadu (promenljiva WW_i , $i = 1, \dots, 4$, brojeći u smeru kazaljke od donje stranice a) kreeće se u rasponu od 0,2 do 0,8, pri čemu su se razmatrala se četiri tipa prozora (promenljiva W_i), a to su:

- W_1 – dvostruka okna s običnim staklima;
- W_2 – dvostruka okna s refleksionim staklima;
- W_3 – dvostruka okna s niskoemisionim premazom na spoljašnjoj strani unutrašnjeg okna;
- W_4 – dvostruka okna s niskoemisionim premazom na unutrašnjoj strani spoljašnjeg okna.

Tabela 4.1 Podaci o promenljivima

Promenljiva		Tip	Raspon ili vrednosti
a/b	Koeficijent oblika	Kontinualna	[0.1, 1.0]
Or	Orijentacija	Kontinualna	[0, 90]
W	Tip prozora	Diskretna	(1, 2, 3, 4)
WW_1	Koeficijent zastakljenosti 1	Kontinualna	[0.2, 0.8]
WW_2	Koeficijent zastakljenosti 2	Kontinualna	[0.2, 0.8]
WW_3	Koeficijent zastakljenosti 3	Kontinualna	[0.2, 0.8]
WW_4	Koeficijent zastakljenosti 4	Kontinualna	[0.2, 0.8]
WI	Zidna izolacija	Diskretna	(1, 2, 3, 4, 5, 6)
RI	Krovna izolacija	Diskretna	(1, 2, 3, 4, 5, 6)

Metodologija evaluacije algoritama za višekriterijumsku optimizaciju biće ilustrovana na algoritmima opisanim u poglavlju 4.3, odnosno na genetskom algoritmu i četiri varijante algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje, od čega su prva dva varijante osnovne verzije algoritma (BB-BC1 i BB-BC2), dok su druga dva varijante hibridnog algoritma (HBB-BC1 i HBB-BC2). Algoritam BB-BC1 je izvorni oblik algoritma, dok se u algoritmu BB-BC2 za centar mase koristi najbolja jedinka iz poslednje iteracije. U hibridnim varijantama algoritma faza Velikog praska računa se po jednačini (4.5) umesto po jednačini (4.3), pri čemu se i u ovom slučaju u drugom algoritmu, tj. u algoritmu HBB-BC2, za centar mase uzima najbolja jedinka iz poslednje iteracije. Karakteristike ispitivanih algoritama prikazane su u Tabeli 4.2. Pored ova četiri algoritma, u cilju detaljnije ilustracije primenjene metodologije evaluacije različitih metoda višekriterijumske optimizacije primenjen je i klasičan genetski algoritam (GA).

Tabela 4.2 Karakteristike analiziranih algoritama

Oznaka	Tip	Opis
BB-BC1	Osnovni	Centar mase po jednačini (3) Veliki prasak po jednačini (4)
BB-BC2	Osnovni	Centar mase je najbolja jedinka iz prethodne iteracije Veliki prasak po jednačini (4)
HBB-BC1	Hibridni	Centar mase po jednačini (3) Veliki prasak po jednačini (5)
HBB-BC2	Hibridni	Centar mase je najbolja jedinka iz prethodne iteracije Veliki prasak po jednačini (5)

Za sve testirane algoritme radilo se sa populacijom od 100 jedinki. Za genetski algoritam primenjena je verovatnoća ukrštanja od 0,8, binarna turnirska selekcija i mutacija od 0,2. Za sve četiri varijante algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje prikazane u Tabeli 1, vrednost parametra α iz jednačina (4.4) i (4.5) iznosila je 1,0 jer se na taj način obezbeđuje pretraživanje čitave oblasti definisanosti svih promenljivih, dok su vrednost parametara β i γ iz jednačine (4.5) u hibridnim verzijama algoritma iznosile 0,2 i 0,8, respektivno. Ove vrednosti su usvojene na osnovu trideset probnih puštanja algoritma u rad.

4.6 Rezultati i diskusija

Kako bi se evaluirali opisani algoritmi, svaki program je pušten u rad pet puta, odnosno sprovedeno je pet iteracija. U Tabeli 4.3 prikazana su najbolja proračunska vremena, ekstremna rešenja i broj tačaka u dobijenim Pareto frontovima. Može se uočiti da su sve verzije algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje daleko nadmašile genetski algoritam u svakom pogledu.

Tabela 4.3 Najbolji rezultati iz pet iteracija

Algoritam	Pros. vreme	Ekstremno rešenje 1 LCC (\$), LCI(MJ)	Ekstremno rešenje 2 LCC (\$), LCI(MJ)	Broj Pareto rešenja
GA	24.9 h	$(3.675 \times 10^5; 4.351 \times 10^7)$	$(3.960 \times 10^5; 3.775 \times 10^7)$	21
BB-BC1	16.9 h	$(3.667 \times 10^5; 4.380 \times 10^7)$	$(3.978 \times 10^5; 3.758 \times 10^7)$	24
BB-BC2	16.6 h	$(3.663 \times 10^5; 4.372 \times 10^7)$	$(3.985 \times 10^5; 3.750 \times 10^7)$	26
HBB-BC1	16.8 h	$(3.656 \times 10^5; 4.401 \times 10^7)$	$(4.005 \times 10^5; 3.733 \times 10^7)$	30
HBB-BC2	16.6 h	$(3.652 \times 10^5; 4.398 \times 10^7)$	$(4.014 \times 10^5; 3.728 \times 10^7)$	31

Poređenjem vremena i rezultata dobijenih algoritmima BB-BC1 i BB-BC2, i HBB-BC1 i HBB-BC2, respektivno, može se uočiti da se korišćenjem najbolje jedinike prethodne populacije kao centra mase za narednu iteraciju umesto primenom jednačine (4.3) postupak proračuna može donekle ubrzati bez značajnijeg uticaja na kvalitet konačnog rešenja. S druge strane, upoređivanjem vremena i rezultata dobijenih algoritmima BB-BC1 i HBB-BC1, odnosno BB-BC2 i HBB-BC2, respektivno, može se zaključiti da hibridizacije ne utiče bitno na brzinu rada programa, ali da hibridne verzije algoritma daju bolja ekstremna rešenja i veći broj tačaka u okviru Pareto fronta.

Ovde je važno napomenuti da se kod algoritama za optimalno projektovanje zelenih zgrada najveći deo vremena troši na proračun utroška energije, tako da se logički može očekivati da bi u jednostavnijim verzijama programa, u kojima se ne

bi koristili dodatni eksterni programi, razlike u proračunskim vremenima bile daleko izraženije.

Razlike u dobijenim Pareto frontovima mogu se dalje diskutovati na osnovu rezultata triju metrika performansi, prikazanima u Tabeli 4.4.

Dobijeni rezultata pokazuju da su sve četiri verzije algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje dale vidno bolje rezultate nego genetski algoritam. Relativno niski rezultati dobijeni u MS metrici ukazuju na to da genetski algoritam ima poteškoća u pronalaženju ekstremnih vrednosti Pareto fronta, na šta su ukazali i drugi istraživači [Wan 06]. Pored toga, ekstremno niske vrednosti S metrike ukazuju na problem u pogledu ravnomernosti raspodele rešenja na Pareto frontu, što je i potvrđeno detaljnijom analizom Pareto frontova dobijenih genetskim algoritmom, pri čemu je uočeno da rešenja pokazuju tendenciju nagomilavanja u blizini ekstremnih vrednosti, dok je srednji deo Pareto fronta ostao relativno nepokriven. Ovo se može smatrati ozbiljnim nedostatkom, budući da se upravo u toj zoni nalaze rešenja koja su najzanimljivija projektantu, jer ona predstavljaju kompromis između suprotstavljenih funkcija cilja.

Poređenje rezultata dobijenih algoritmima BB-BC1 i BB-BC2, i HBB-BC1 i HBB-BC2, respektivno, pokazuje da korišćenje najbolje jedinke kao novog centra mase ne utiče bitno na kvalitet konačnog Pareto fronta. Međutim, hibridne verzije algoritma nadmašile su osnovne verzije u sve tri metrike, tako da se može zaključiti da se ovim vidom hibridizacije značajno poboljšavaju performanse algoritma Veliki prasak – veliko sažimanje.

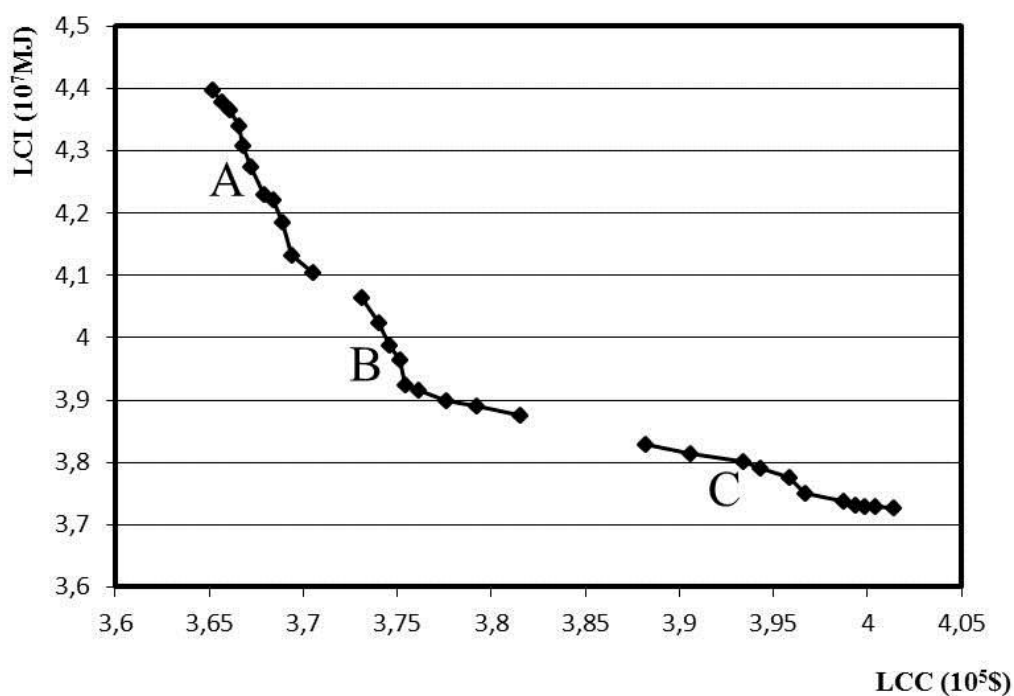
Rešenja iz najboljeg dobijenog Pareto fronta (dobijenog algoritmom HBB-BC2) prikazana su u Tabeli 4.5 raspoređena po uzlaznom redosledu ukupnih troškova tokom životnog veka objekta, i prikazana su na Slici 4.1. Na slici se može uočiti da je dobijeni Pareto front vidljivo podeljen na tri zone: *A*, *B* i *C*. U zoni *A* nalaze se rešenja s nižom cenom ali većim uticajem na okolinu, u zoni *C* su rešenja s višom cenom a manjim uticajem na okolinu, dok se u zoni *B* nalaze rešenja koja se mogu smatrati kompromisom između datih zahteva.

Tabela 4.4 Rezultati metrika za procenu performanse

C metrika	Iteracija				
Algoritam	1	2	3	4	5
GA vs. BB-BC1	0.05	0.10	0.08	0.12	0.10
BB-BC1 vs. GA	0.36	0.41	0.54	0.43	0.48
GA vs. BB-BC2	0.12	0.07	0.14	0.08	0.16
BB-BC2 vs. GA	0.35	0.45	0.34	0.48	0.62
GA vs. HBB-BC1	0.07	0.08	0.10	0.08	0.12
HBB-BC1 vs. GA	0.52	0.42	0.45	0.43	0.36
GA vs. HBB-BC2	0.05	0.07	0.08	0.08	0.10
HBB-BC2 vs. GA	0.44	0.45	0.40	0.38	0.35
BB-BC1 vs. BB-BC2	0.24	0.22	0.16	0.20	0.27
BB-BC2 vs. BB-BC1	0.21	0.25	0.14	0.22	0.20
BB-BC1 vs. HBB-BC1	0.18	0.25	0.15	0.17	0.20
HBB-BC1 vs. BB-BC1	0.30	0.29	0.41	0.36	0.35
BB-BC1 vs. HBB-BC2	0.17	0.23	0.18	0.15	0.18
HBB-BC2 vs. BB-BC1	0.31	0.28	0.39	0.38	0.35
BB-BC2 vs. HBB-BC1	0.20	0.22	0.15	0.16	0.15
HBB-BC1 vs. BB-BC2	0.27	0.29	0.35	0.36	0.35
BB-BC2 vs. HBB-BC2	0.18	0.22	0.17	0.15	0.17
HBB-BC2 vs. BB-BC2	0.34	0.31	0.36	0.38	0.36
HBB-BC1 vs. HBB-BC2	0.24	0.27	0.21	0.24	0.25
HBB-BC2 vs. HBB-BC1	0.25	0.25	0.22	0.22	0.21
S metrika	Iteracija				
Algoritam	1	2	3	4	5
GA	5.4810	6.7131	7.0713	5.0103	6.6024
BB-BC1	26.3409	27.0202	26.5421	26.3502	27.7027
BB-BC2	25.1432	26.2601	27.3132	28.4409	27.9801
HBB-BC1	28.4536	29.9812	27.8547	26.8961	29.5243
HBB-BC2	29.0809	29.0133	28.2556	28.0170	28.3645
MS metrika	Iteracija				
Algoritam	1	2	3	4	5
GA	0.8188	0.7851	0.7517	0.7215	0.8517
BB-BC1	0.9545	0.9615	0.9890	0.9512	0.9472
BB-BC2	0.9448	0.9526	0.9692	0.9784	0.9209
HBB-BC1	0.9902	0.9884	0.9841	0.9725	0.9940
HBB-BC2	0.9901	0.9895	0.9930	0.9889	1.0000

Tabela 4.5 Pareto rešenja dobijena algoritmom HBB-BC2.

№	a/b	Or	W	WW_2	$WW_{1,3,4}$	WI	RI	LCC ($10^5\$$)	LCI (10^7MJ)	Pareto zona
1.	0.989	0	W_1	0.20	0.2	1	1	3.652	4,398	A
2.	0.877	0	W_1	0.20	0.2	1	1	3.657	4,378	
3.	0.801	0	W_1	0.20	0.2	1	1	3.661	4,365	
4.	0.729	0	W_1	0.20	0.2	1	1	3.666	4,340	
5.	0.956	0	W_1	0.22	0.2	1	2	3.668	4,309	
6.	0.862	0	W_1	0.24	0.2	1	2	3.672	4,275	
7.	0.747	0	W_3	0.25	0.2	3	2	3.679	4,229	
8.	0.688	0	W_3	0.28	0.2	1	2	3.684	4,222	
9.	0.798	0	W_1	0.29	0.2	3	2	3.689	4,186	
10.	0.976	0	W_3	0.30	0.2	3	3	3.694	4,132	
11.	0.961	0	W_1	0.31	0.2	3	3	3.705	4,105	
12.	0.955	0	W_3	0.34	0.2	3	3	3.731	4,065	B
13.	0.841	0	W_3	0.36	0.2	3	3	3.740	4,025	
14.	0.795	0	W_3	0.41	0.2	3	3	3.746	3,988	
15.	0.697	0	W_3	0.45	0.2	3	3	3.751	3,965	
16.	0.927	0	W_3	0.54	0.2	3	4	3.754	3,924	
17.	0.811	0	W_3	0.63	0.2	3	4	3.761	3,915	
18.	0.769	0	W_3	0.63	0.2	3	4	3.776	3,900	
19.	0.954	0	W_3	0.65	0.2	6	4	3.792	3,890	
20.	0.966	0	W_3	0.67	0.2	3	5	3.815	3,875	C
21.	0.878	0	W_3	0.72	0.2	3	5	3.882	3,830	
22.	0.898	0	W_4	0.75	0.2	6	5	3.906	3,815	
23.	0.943	0	W_3	0.80	0.2	3	6	3.934	3,801	
24.	0.922	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.943	3,790	
25.	0.810	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.958	3,777	
26.	0.747	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.967	3,751	
27.	0.729	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.987	3,738	
28.	0.702	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.993	3,731	
29.	0.693	0	W_4	0.80	0.2	6	6	3.998	3,730	
30.	0.636	0	W_4	0.80	0.2	6	6	4.004	3,729	
31.	0.612	0	W_4	0.80	0.2	6	6	4.014	3,728	



Slika 4.1. Pareto front dobijen algoritmom HBB-BC2

U svim rešenjima u okviru dobijenog Pareto fronta ugao orijentacije u odnosu na sever (Or) iznosi 0, što znači da zidovi imaju jasno definisanu orijentaciju u skladu sa stranama sveta, tako da se može govoriti o istočnom zidu (W_1), južnom zidu (W_2), zapadnom zidu (W_3) i severnom zidu (W_4).

Koeficijent zastakljenosti (WW_i , $i = 1, \dots, 4$), to jest odnos površine prozora i zida promenljiv je samo za južni zid (WW_2), dok je za ostala tri zida zida konstantan i jednak minimalnoj vrednosti od 0,2. Uočljivo je da se ova vrednost za južni zid menja mnogo sporije u zonama A i C, dok je u zoni B promena bitno izraženija. Ovo je jedina promenljiva čija je monotonost u direktnoj vezi s oblikom dobijenog Pareto fronta, tšo bi moglo biti značajno i zanimljivo s matematičke tačke gladišta.

Koeficijent oblika (a/b) ima promenljivu vrednost u rasponu od 0,612 do 0,989, ali može se uočiti da monotono opada u intervalima u kojima su parametri u vezi s izolacijom i zidovima konstantni, a da sa svakom promenom parametara izolacije ili zidova na veću vrednost dolazi do diskontinuiteta u vrednosti koeficijenta oblika i skoka na vrednosti bliske kvadratu, tj. 1, što ukazuje na to da se za fiksirane vrednosti svih drugih parametara najpovoljnija cena dobija za zgradu kompaktnijeg oblika osnove,

bliskog kvadratu, dok zgrade s izduženijim severnim i južnim zidom daju bolje performanse u pogledu uticaja na okolinu.

Kao što se i moglo očekivati, primenom bolje izolacije raste cena a smanjuje se uticaj na okolinu, ali promene izolacije u zidovima (WI) i krovu (RI) pokazuju različito ponašanje u okviru dobijenog Pareto fronta. Dok se izolacija u krovu postepeno povećava, uzimajući redom svih šest mogućih vrednosti u manje-više ujednačenom tempu, izolacija u zidovima menja se izraženo sporije i diskontinualno. Može se uočiti da se izolacije tipa 2, 4 i 5 ne pojavljuju ni u jednom rešenju dobijenog Pareto fronta, što bi se moglo objasniti činjenicom da je krov direktnije izložen dejstvu sunca i da ima mnogo veći uticaj na konačan rezultat nego zidovi. S druge strane, promene izolacije u zidovima i krovu ne pokazuju nikakvu značajniju povezanost sa zonama dobijenog Pareto fronta, osim napred navedenog očekivanog uticaja kvaliteta na cenu.

Većina Pareto optimalnih rešenja ima dvostruki niskoemisioni sloj na unutrašnjoj strani spoljašnjeg okna (W_3) ili na spoljašnjoj stranu unutrašnjeg okna (W_4). Prozori s dvostrukim običnim staklom (W_1) pojavljuju se u blizini ekstremnih rešenja u zoni A, to jest u konstrukcijama s niskom cenom a velikim uticajem na životnu sredinu, dok se prozori tipa W_2 , odnosno prozori s dvostrukim refleksionim staklima, ne nalaze ni u jednom od rešenja dobijenog Pareto fronta. Iako promena tipa prozora nema bitnog uticaja na oblik Pareto fronta, uočljivo je da se prozori s niskoemisionim premazom na spoljašnjoj strani unutrašnjeg okna (W_3) pojavljuju u sve tri zone I da su relativno ravnomerno raspoređeni, tako da se može izvući uopšteni zaključan da ovaj tip prozora predstavlja dobar kompromis između cene i uticaja na okolinu.

Iz prikazane analize rezultata može se zaključiti da dobijeni Pareto front daje dobar uvid u međuzavisnost između različitih elemenata konstrukcije i suprotstavljenih ciljeva, što omogućava projektantu i/ili donosiocu odluke sprovede temeljnu analizu na osnovu kojom će se doći do optimalnog rešenja shodno datim zahtevima i ograničenjima. Pored toga, ostala četiri Pareto fronta dobijena algoritmom HBB-BC2 veoma su bliska razmatranom (najboljem) Pareto frontu, što pokazuje da bi i samo jedno puštanje programa u rad dalo zadovoljavajuće rezultate i podatke za projektovanje.

5. Zaključak

5.1 Zadaci i ostvareni rezultati

U nastojanjima da održivost prevaziđe nivo teorijskih razmatranja i postane način razmišljanja, poslovanja i življenja, jedan od najvažnijih koraka jeste postizanje kompromisa između ekonomskih i ekoloških aspekata gradnje energetski održivih objekata, tim pre ako se ima u vidu da su ekološki povoljnija rešenja u velikom broju slučajeva ujedno i značajno skuplja. Zbog toga je u odabiru različitih, naizgled međusobno nezavisnih i nesrodnih elemenata energetski efikasnih zgrada, kao što su oblik, orijentacija u prostoru, tip izolacije i tip i veličina prozora, neophodno izvršiti detaljnu analizu njihovih različitih mogućih kombinacija kako bi se pronašla ona koja će donosiocu odluke – projektantu ili investitoru – biti prihvatljiva i s ekonomske i s ekološke tačke gledišta. Pri tom treba imati u vidu i sadejstvo različitih parametara pošto se zajednički učinak pojedinačnih elemenata ne može uvek dobiti prostim sabiranjem. Drugim rečima, ukoliko se pri izgradnji objekta koriste samo najbolji (a samim tim verovatno i najskuplji) materijali i sistemi, to ne mora značiti da se najbolji rezultati mogu postići isključivo njihovim sadejstvom. Štaviše, često se pokaže da je dovoljno odabrati samo jedan ili dva vrhunska proizvoda, dok drugi mogu biti i nešto slabijih performansi (i shodno tome jeftiniji) a da konačan učinak bude isti ili zanemarljivo slabiji nego u slučaju da su odabrane isključivo najbolje i najskuplje opcije.

Problem se dodatno usložnjava ako se ima u vidu da se pri projektovanju energetski efikasnih zgrada ne posmatra samo cena objekta i njegove gradnje, nego se u obzir uzimaju i svi troškovi i uticaj na životnu sredinu tokom čitave eksploatacije, odnosno okom celog životnog veka objekta.

Iz svega navedenog jasno je da tradicionalni pristup u projektovanju, u kome na osnovu iskustva ili intuicije napravi nekoliko mogućih rešenja između kojih se bira najbolje, u slučaju održive gradnje nema smisla i da je neophodno koristiti napredne

metode i tehnike višekriterijumske optimizacije kako bi razmotrila sva potencijalna rešenja i odabralo ono koje predstavlja zadovoljavajući kompromis između ekonomskog i ekološkog aspekta problema.

Rapidan razvoj informacione tehnologije tokom poslednje dve decenije rezultovao je, između ostalog, i pojavom velikog broja novih optimizacionih algoritama, kao i njihovih hibrida, tj. metoda dobijenih kombinovanjem određenih povoljnih svojstava i mogućnosti dveju ili više različitih tehnika optimizacije. U naučnoj i stručnoj literaturi svake godine se pojavi nekoliko novih metoda i unapređenih ili hibridnih varijanti starih. To projektanta stavlja pred novi problem, pošto treba odabrati najpodesniji algoritam za dati zadatak, što se može ostvariti jedino isprobavanjem različitih mogućnosti i poređenjem rezultata. U slučaju jednokriterijumske optimizacije to je relativno lako, jer se poredi samo jedno, najbolje rešenje, ali kod višekriterijumske optimizacije, pogotovo u slučaju konfliktnih kriterijuma, ne postoji jedinstveno rešenje problema, već čitav niz potencijalnih rešenja između kojih donosilac odluke bira ono koja mu najviše odgovara u datim uslovima. Stoga je neophodno uspostaviti kriterijume za ocenu kvaliteta dobijenog skupa rešenja, kojima će se u obzir uzeti svi aspekti i svojstva koja Pareto front treba da ima, a to su, pre svega, raspon, ujednačenost i pokrivenost.

Jedna od osnovnih karakteristika građevinskih projekata, pogotovo u oblasti održive gradnje, jeste njihova visoka cena, što znači da je u realnosti nedopustiva bilo kakva površnost i da optimizacija u projektovanju više nije misaoni eksperiment ili lartpurlartizam, nego stvarna potreba i projektantova obaveza. Stoga je neophodno prvo uspostaviti adekvatnu metodologiju za izbor najpodesnije metode optimizacije, pa tek onda pristupiti odabiru konstruktivnih elemenata i parametara objekta.

Cilj ove disertacije bio je da sve napred navedeno analitički dokaže i da se ustanovi metodologija poređenja rešenja dobijenih različitim metodama višekriterijumske optimizacije, zasnovana na matematičkoj formulaciji zahteva koje kvalitetan Pareto front treba da ispunjava.

Analizom postojeće literature iz oblasti optimalnog dimenzionisanja armiranobetonskih konstrukcija pokazano je da u građevinarstvu pojam optimalnog nije

apsolutna, matematički samerljiva kategorija i da se u izboru najpovoljnijeg rešenja u obzir moraju uzeti i njegovi praktični aspekti, tj. izvodljivost u realnim uslovima, trajnost, ponašanje zgrade u eksploataciji i sl.

Matematičkom formulacijom Ciclerovih kriterijuma za evaluaciju kvaliteta Pareto fronta uspostavljena je metodologija za poređenje delotvornosti različitih metoda višekriterijumske optimizacije. Primenjena metodologija je zatim testirana na primeru projekta energetski efikasne zgrade, koji zbog broja nezavisnih promenljivih i konfliktnih kriterijuma spada u NP teške kombinatorne probleme. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da prikazana metodologija zadovoljava, pošto jasno ukazuje na prednosti i nedostatke različitih metoda optimizacije, i to zasebno za svako od bitnih svojstava Pareto fronta, a to su raspon, pokrivenost i ujednačenost.

5.2 Naučni i stručni doprinos disertacije

Kao najbitniji rezultati ostvareni tokom istraživanja prikazanog u ovoj disertaciji mogu se navesti:

- Analizom konkretnog primera iz inženjerske prakse pokazano je da se u građevinarstvu pojam optimalnost ne može razmatrati samo s ekonomske tačke gledišta, već da se mora imati u vidu i praktični aspekt svakog datog problema, odnosno ostvarljivost rešenja u realnim uslovima.
- U projektovanju energetski efikasnih zgrada ne može se kao kriterijum optimalnosti usvojiti samo cena konstrukcije i ugrađenih sistema, nego se u obzir moraju uzeti i svi troškovi tokom eksploatacije objekta, kao i uticaj na životnu sredinu tokom gradnje i životnog veka zgrade. Iz toga se doadtno može zaključiti da jednokriterijumska optimizacija nije primenljiva u rešavanju problema optimizaije energetski efikasnih

zgrada i da takve zadatke treba rešavati podesno izabranom metodom višekriterijumske optimizacije.

- Pošto niskoemisioni materijali i sistemi obično imaju relativno visoku cenu, mnogo je bolje isiptati mogućnost kombinovanja skupljih i jeftinijih komponenti, budući da se i tako mogu ostvariti zadovoljavajući rezultati, umesto da se uzima zdravo za gotovo da će najskuplja oprema dati najbolje rezultate.
- Pri ispitivanju različitih idejnih rešenja neprimenljiv je tradicionalni pristup pravljenja kombinacija različitih elemenata na osnovu intuicije ili iskustva, te je zato mnogo preporučljivije odgovarajuću analitičku metodu pretrage.
- Ne postoji univerzalno najbolja metoda optimizacije. Efikasnost svake metode zavisi od matematičke formulacije problema, tipa promenljivih i formulacije funkcija cilja. Stoga je preporučljivo isprobati nekoliko različitih metoda kako bi se utvrdilo koja daje najbolje rezultate za dati problem.
- Ciclerovi kriterijumi za evaluaciju kvaliteta Pareto fronta pokazali su se kao podesna metoda poređenja efikasnosti različitih optimizacionih algoritama.
- Hibridizacijom različitih algoritama mogu se otkloniti nedostaci njihovih izvornih verzija.
- Za korišćene funkcije cilja dobijeni su Pareto frontovi koji imaju tri vidljivo razdvojene zone – jednu koja je sačinjena od ekonomski povoljnijih rešenja, jedno koja je sačinjena od ekološki povoljnijih rešenja i treću, koja sadrži uslovno rečeno kompromisna rešenja za ova dva suprotstavljena zahteva, te je upravo zato i najzanimljivija donosoicu odluke.
- U projektovanju energetski efikasnih zgrada, moguće je na osnovu Pareto fronta uočiti i ustanoviti međuzavisnosti između promenljivih

koje je inače nemoguće uspostaviti matematičkim putem i na osnovu toga izvući korisne empirijske zaključke o uticaju pojedinih parametara na ekonomski i ekološki aspekt problema.

5.3 Pravci i smernice za dalja istraživanja

Budući da, globalno gledano, formulacija problema optimalnog izbora parametara i elemenata energetske zgrade ima manje-više istu formu i ograničenja, logičan nastavak prikazanog istraživanja bio bi da se na istom problemu ispita što je moguće veći broj različitih metoda višekriterijumske optimizacije kako bi se izdvojila grupa od nekoliko najpodesnijih. Na taj način bi se uspostavila neka vrsta empirijske preporuke projektantima kojim metodama da daju prednost, što bi im bitno uštedelo vreme pri rešavanju ovog problema.

Matematička formulacija Cicerovih kriterijuma omogućava kompjutersko poređenje rezultata dobijenih različitim metodama optimizacije, što je bitan napredak u procesu automatizacije čitavog procesa proračuna i evaluacije dobijenih rešenja.

Dobijeni rezultati ukazuju na to da bi daljim istraživanjem i testiranjem mogao da se napravi napredak u pogledu vremena potrebnog za optimalan odabir konstruktivnih elemenata i sistema u energetske efikasnim objektima.

6. Literatura

- [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.
- [Ach 07] Achtziger, W. (2007). On simultaneous optimization of truss geometry and topology. *Struct. Multidisc. Optim.* 33, 285–304.
- [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.
- [Agh 14] Aghaei, J.; Muttaqi, K.M.; Azizivahed, A.; Gitizadeh, M. Distribution expansion planning considering reliability and security of energy using modified PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm, *Energy*, 2014, 65, 398–411.
- [Aky 07] Akyol, A.; Yaslan, Y.; Erol, O.K. A genetic programming classifier design approach for cell images, *Proceedings of the 9th European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty*, 2007, 878–888.
- [Als 94] Y.A. Al-Salloum, G.H. Siddiqi G.H., Cost optimum design of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(6), p.p. 647–55.
- [Alq 11] M. A. Alqedra, I. Mohammed, Optimum Cost of Prestressed and Reinforced Concrete Beams using Genetic Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence*, 2011, 4, p.p. 76-88.
- [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.
- [Ass 16] Ashara A. et al. Applicability Problem in Optimum Reinforced Concrete Structures Design, MATEC Web of Conferences 7304005 7, 04005 (2016).
- [Bal 97] Balling RJ, Yao X. Optimization of reinforced concrete frames. *J. Struct. Eng.*, 1997;123(2):193-202.
- [Bak 00] Baker, N.; Steemers, K. Energy and environment in architecture: a technical design guide, E&FN Spon, New York, 2000.
- [Bar 12] A.F.M. Barros, M.H.F.M. Barros, C.C. Ferreira, Optimal design of rectangular RC sections for ultimate bending strength, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2012, 45, p.p. 845–860.
- [Bek 12] G. Bekdas, S.M. Nigdeli, Cost Optimization of T-shaped Reinforced Concrete Beams under Flexural Effect According to ACI 318, *Proceedings of the 3rd European Conference of Civil Engineering (ECCIE '12)*, 2012, p.p. 122-126.
- [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.
- [Ben 95] Bennage, W.A.; Dhingra, A.K. Single and multi-objective structural optimization in discrete-continuous variables using simulated annealing, *Int J Numer Methods Eng* 1995, 38, 2753–73.
- [Ben 03] Bendsøe, M. P. and O. Sigmund (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Berlin: Springer.
- [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.

- [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.
- [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.
- [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 95] Beasley J.E., "Lagrangean Relaxation", In: *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Reeves C.R. (ed), McGraw-Hill, pp. 243-303 (1995).
- [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.
- [Cal 03] Caldas, L. G.; Norford, L.K. Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems, *Journal of solar energy engineering*, 2003, 125(3), 343–351.
- [Cam 04] Camp, C.V.; Bichon, J. Design of space trusses using ant colony optimization. *J Struct Eng, ASCE* 2004, 130(5), 741–51.
- [Cam 07] Camp, C.V. Design of space trusses using big bang-big crunch optimization, *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133, 999–1008.
- [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.
- [Cha 92a] B.K. Chakrabarty, Models for optimal design of reinforced concrete beams. *Computers and Structures*, 1992, 42(3), p.p. 447–51.
- [Cha 92b] B.K. Chakrabarty, A model for optimal design of reinforced concrete beam. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 1992, 118(11), p.p. 3238–42.
- [Cho 77] T. Chou, Optimum reinforced concrete T-beam sections. *Journal of the Structural Division ASCE*, 1977, 103(8), p.p. 1605–17.
- [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 97] C.A. Coello, A.D. Christiansen, F. Santos Hernandez, A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams. *Engineering and Computers*, 1997, 13, p.p. 185–96.
- [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.
- [Cul 75] Culmann, K. (1875). *Die graphische Statik*. Zurich: Meyer & Zeller.
- [Dan 63] Dantzig, G.B., *Linear programming and extensions*, Rand Corporation and University of California, Berkeley 1963.
- [Deb 01] Deb, K. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001.
- [Dei 14] Deihimi, A; Solat, A. Optimized echo state networks using a big bang - big crunch algorithm for distance protection of series-compensated transmission lines, *Int J Electr Power Energy Syst*, 2014, 54, 408–24.

- [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.
- [Dog 07] Dogan, M.; Istefanopulos, Y. Optimal nonlinear controller design for flexible robot manipulators with adaptive internal model, *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1, 770–778.
- [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., Colorni 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).
- [EP 15] Available online:
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (accessed on 30 August 2015)
- [Ero 06] Erol, O.K.; Eksin, I. New optimization method: Big Bang–Big Crunch, *Adv Eng Software* 2006, 37, 106–111.
- [Esb 96] Esbensen, H. and Kuh, E.S.: Design space exploration using the genetic algorithm, In *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'96)*, Volume 4, pp 500–503, IEEE Press, Piscataway, New Jersey, 1996.

- [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> (accessed on 30 August 2015)
- [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> (accessed on 30 August 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.
- [Fis 04] Fisher M., "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", *Management Science* 50, pp. 1872-1874 (2004).
- [Fla 12] Flager, F.; Basbagill, J., Lepech, M.; Fischer, M. Multi-objective building envelope optimization for life-cycle cost and global warming potential, In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, ECPPM 2012*, Edited by Gudni Gudnason and Raimar Scherer, CRC Press, Boca Raton, USA, 2012, 193–200.
- [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 Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-IV)*, pp 584–593, Springer, Berlin, Germany, 1996.
- [Fon 98] 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.
- [Fri 74] L. Friel, Optimum singly reinforced concrete sections. *ACI Journal*, 1974; 71(11), p.p. 1556–8.

- [Gal 38] Galileo Galilei (1638). *Discorsi e Dimonstrazioni Matematiche*, Interno, a Due Nuove Scienze. Leida.
- [Gen 09] Genc, H.M.; Erol, O.K.; Eksin, I. An application and solution to gate assignment problem for Ataturk Airport, *Proceedings of the 6th IFAC International Workshop on Knowledge and Technology Transfer in/to Developing Countries: Automation and Infrastructure*, 2009, 125–130.
- [Gen 13] Genc, H.M.; Eksin, I.; Erol, O.K. Big bang-big crunch optimization algorithm with local directional moves, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2013, 21, 1359–1375.
- [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 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).
- [Glo 03] Glover F., Kochenberger G.A., "Handbook of Metaheuristics", Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London (2003).
- [Gol 89] Goldberg D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Mass., pp 412, (1989).
- [Gol 98] Goldberg, D.E. *Genetic algorithm in search optimization and machine learning*. Reading (MA, USA): Addison Wesley Publishing Co. Inc.; 1998.
- [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.
- [Gov 05] V. Govindaraj, J.V. Ramasamy, Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. *Computers and Structures*, 2005, 84, p.p. 34-48.
- [Gov 07] V. Govindaraj, J.V. Ramasmy, Optimum detailed design of reinforced concrete frames using genetic algorithms. *Engineering Optimization*, 2007, 39(4), p.p. 471-494.

- [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.
- [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.
- [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).
- [Ima 82] Imai, K. and L. A. Schmit (1982). Configuration optimization of trusses. *J. Struct. Div. ASCE* 107 (ST5), 745–756.
- [Jah 13] M.M. Jahjough, M.H. Arafa, M.A. Alqedra, Artificial Bee Colony (ABC) algorithm in the design optimization of RC continuous beams, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47 (6), p.p. 963-979.
- [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.

- [Kan 91a] S. Kanagasundram, B.L. Karihaloo, Minimum cost design of reinforced concrete structures. *Computers and Structures*, 1991, 41(6), p.p. 1357–64.
- [Kan 91b] S. Kanagasundram, B.L. Karihaloo, Minimum cost reinforced concrete beams and columns. *Computers and Structures*, 1991, 41(3), p.p. 509–18.
- [Kan 39] Kantorovič, L.V. (1939) *Matematičeskie metodi v organizacii i planirovanii proizvodstva*. Leningrad: Izdatelstvo Leningradskogo universiteta.
- [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 09] Kaveh, A., Talatahari, S. Size optimization of space trusses using Big Bang - Big Crunch algorithm, *Comput Struct*, 2009, 87(17–18), 1129–40.
- [Kav 11] A. Kaveh, O. Sabzi, A comparative study of two meta-heuristic algorithms for optimum design of reinforced concrete frames *International Journal of Civil Engineering*, 2011, 9(3), p.p. 193-206.
- [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 83] U. Kirsch, Multilevel optimum design of reinforced concrete structures. *Engineering Optimization*, 1983, 6(4), p.p. 207–12.
- [Kir 95] Kirsch, U. (1995). Layout optimization using reduction and expansion processes. In [Olhoff and Rozvany, 1995], pages 95–102.
- [Kou 98] V.K. Koumoussis, S.J. Arsenis, Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members. *Comput Aided*

Civil Infra-structural Engineering, 1998;13, p.p. 43–52.

- [Kov 08] Kovačević, J., "Hybrid Genetic Algorithm For Solving The Low-Autocorrelation Binary Sequence Problem", *Yugoslav Journal of Operations Research* (2008).
- [Kra 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.
- [Lak 85] N. Lakshmanan, V.S. Parameswaran, Minimum weight design of reinforced concrete sections for flexure. *IE (I) J*, 1985, 66, p.p. 92–8.
- [Lam 08] Lamberti L. An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures. *Comput Struct* 2008, 86, 1936–1953.
- [Laz 38] Lazarević, Đ., Prilog za racionalno dimenzioniranje savijenih nosača od armiranog betona, *Građevinski vjesnik*, VII, 65–67, 1938.
- [Lee 04] Lee, K.S.; Geem, Z.W. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm. *Comput Struct* 2004, 82, 781–798.
- [Lei 99] Leite, J.P.B., Topping, B.H.V. Parallel simulated annealing for structural optimization. *Comput Struct* 1999, 73, 545–69.
- [Li 07] Li, L.J.; Huang, Z.B.; Liu, F.; Wu, Q.H.. A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures, *Comput Struct* 2007, 85, 340–349.
- [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.
- [Lic 13] Lichocki, P.; Wischmann, S.; Keller, L.; Floreano, D. Evolving team compositions by agent swapping, *IEEE Trans Evol Comput* 2013, 17(2), 282–98.
- [Lin 11] Lin, J.Y.; Chen, Y.P. Analysis on the collaboration between global search and local search in memetic computation, *IEEE Trans Evol Comput* 2011, 15(5), 608–23.

- [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] Mang, H., Rammerstorfer, F., and Eberhardsteiner, J., editors (2002). Fifth World Congress on Computational Mechanics (WCCM V). Vienna University of Technology, Austria.
- [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 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.
- [Mic 04] Michell, A. G. M. (1904). The limits of economy in frame structures. *Philosophical Magazine Sect. 6*, 8 (47), 589–597.
- [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 13] Milajić, A.; Beljaković, D.; Pejičić, G. Optimal reinforced concrete beams design using hybrid GA-TABU algorithm, *Technics Technologies Education Management*, 2013, 8(2), 533–540.
- [Mil 15] A. Milajić, A. et al.: Quantitative method for evaluating applicability of designed reinforcement pattern. *Technical Gazette*, 2015, 22 (1), p.p. 119-124.
- [Mis 05] Misevicius, A., "A tabu search algorithm for the quadratic assignment problem," *Computational Optimization and Applications* 30, pp. 95-111, 2005.
- [Mit 98] Mitchell, M. An introduction to genetic algorithms. MIT Press; 1998.
- [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.
- [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 B'ezier 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.
- [Olh 80] Olhoff, N. (1980). Optimal design with respect to structural eigenvalues. In *Proc. 15th IUTAM Congress*, Toronto, Canada, pp. 133–149.
- [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.
- [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.
- [Per 07] Perez, R.E.; Behdinan, K. Particle swarm approach for structural design optimization, *Comput Struct*, 2007, 85, 579–588.
- [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. Meth-ods 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 88] A. Prakash, S.K. Agarwala, K.K. Singh, Optimum design of reinforced concrete sections. *Computers and Structures*, 1988, 30(4) p.p. 1009–11.
- [Pra 92] Prašcević, 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.
- [Raj 92] Rajeev, S.; Krishnamoorthy, C.S. Discrete optimization of structures using genetic algorithms, *J Struct Eng, ASCE* 1992, 118(5), 1233–1250.
- [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 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.
- [RSM 15] *Building construction cost data*. Rockland, MA, RS Means, 2015.
- [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.
- [Sak 07] Saka, M.P. Optimum geometry design of geodesic domes using harmony search algorithm, *Adv Struct Eng*, 2007, 10(6), 595–606.
- [Sak 09] Saka, M.P. Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm. *J Construct Steel Res*, 2009, 65(1), 36–43.

- [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.
- [Sar 98] K.C. Sarma, , H. Adeli, Cost optimization of concrete structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1998, 124 (5), p.p. 70-578.
- [Sch 60] Schmidt, L.A., Structural design by systematic synthesis. Proceedings of the second ASCE conference on electronic computation, 1960.
- [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.
- [Sed 14] Sedighzadeh, M.; Esmaili, M.; Esmaeili, M. Application of the hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm to optimal reconfiguration and distributed generation power allocation in distribution systems, *Energy*, 2014, 76, 920–930.
- [Ser 06] Serra, M.; Venini P. On some applications of ant colony optimization metaheuristic to plane truss optimization. *Struct Multidisc Optim* 2006, 32(6) 499–506.
- [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 52] Shanley, Weight-Strength Analysis of Aircraft Structures, McGraw-Hill, New York, 1952.
- [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.
- [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 multiojective 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.

- [Tan 02] Tan, K.C.; Lee, T.H.; Khor, E.F. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: performance assessments and comparisons, *Artificial Intelligence Review*, 2002, 17 (4), 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).
- [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 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> (accessed on 30 August 2015).
- [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.
- [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 rec-ommendations. *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.
- [Wan 05] Wang, W.; Zmeureanu, R. *et al.* Applying multiobjective genetic algorithms in green building design optimization, *Building and Environment*, 2005, 40(11), 1512–1525.
- [Wan 06] Wang, W.; Rivard, H.; Zmeureanu, R. Floor shape optimization for green building design, *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20, 363–378.
- [Wol 97] Wolpert, D. H. and Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary*

Computations, 1:67–82.

- [Wri 01] Wright, L. A.; Kemp, S. 'Carbon footprinting': towards a universally accepted definition, *Carbon Management*, 2001, 2(1), 61–72.
- [Yes 14] Yesil, E. Interval type-2 fuzzy PID load frequency controller using Big Bang - Big Crunch optimization, *Appl Soft Comput*, 2014, 15, 100–12.
- [You 12] S.T. Yousif and R.M. Najem, Optimum cost design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms, *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, 2012, 2 (1), p.p. 79-92.
- [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.
- [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].
- [Zho 91] Zhou, M. and G. I. N. Rozvany (1991). The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput. Meth-ods 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] Zitzler, E.; Thiele, L.; Laumanns, M.; Fonseca, C.M.; Fonseca, V.G. Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003, 7 (2), 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.