

Primljen / Received: 24.4.2024.

Ispravljen / Corrected: 29.8.2024.

Prihvaćen / Accepted: 3.9.2024.

Dostupno online / Available online: 10.10.2024.

# Primjena ekspertnih sustava u građevinarstvu

## Autori:



**Ena Grčić**, univ. mag. ing. aedif.

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku  
Građevni i arhitektonski fakultet Osijek  
[egrčić@gfos.hr](mailto:egrčić@gfos.hr)

Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Marija Šperac**, dipl.ing.građ.

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku  
Građevni i arhitektonski fakultet Osijek  
[msperac@gfos.hr](mailto:msperac@gfos.hr)

Pregledni rad

**Ena Grčić, Marija Šperac**

## Primjena ekspertnih sustava u građevinarstvu

Ekspertni sustavi predstavljaju "IF-THEN" algoritme koji integriraju ljudsko ekspertno znanje radi rješavanja kompleksnih problema. Ovo područje istraživanja fokusira se na pronalaženje rješenja za izazovne situacije koje su često teško riješive klasičnim metodama. Ekspertni sustavi imaju veliku primjenu u građevinarstvu. U radu su prikazane neke od primjena: primjena kod održavanja građevina, inspekcije vodovodnih i kanalizacijskih sustava, primjena u geotehničkom inženjerstvu, održavanje prometnica te odabir odgovarajućih građevnih materijala. Umjetne neuronske mreže efikasne su kod optimizacije financijskog plana, procjene trajanja aktivnosti, procjene produktivnosti radne ekipe te izbora izvođača radova. Genetski algoritmi nalaze svoju primjenu u alokaciji resursa, odabiru optimalnih rješenja kod rasporeda zadataka i troškova projekata te održavanju građevina, dok fuzzy logika pomaže u analizi rizika, upravljanju projektima i procjeni troškova. Ekspertne metode mogu se integrirati u informacijske sustave kako bi pružile dosljedne informacije potrebne za učinkovito upravljanje građevinskim projektima. Pregled objavljenih radova o primjeni ekspertnih metoda u građevinarstvu pokazuje da su ove metode već značajno zastupljene u svim sektorima građevinarstva, ali također upućuje na to da postoje još velike mogućnosti za njihovu buduću primjenu.

### Ključne riječi:

građevinarstvo, ekspertni sustavi, umjetne neuronske mreže, genetski algoritmi, fuzzy logika

Subject review

**Ena Grčić, Marija Šperac**

## Application of expert systems in civil engineering

Expert systems represent "IF-THEN" algorithms that integrate human expert knowledge to solve complex problems. This area of research focuses on finding solutions to challenging situations that are often difficult to resolve using traditional methods. Expert systems have widespread applications in the field of construction. The paper presents some of these applications, including their use in building maintenance, inspection of water and sewage systems, geotechnical engineering, road maintenance, and the selection of appropriate construction materials. Artificial neural networks are effective in optimizing financial plans, estimating the duration of activities, assessing the productivity of work teams, and selecting contractors. Genetic algorithms find their application in resource allocation, selecting optimal solutions for task scheduling and project costs, as well as in building maintenance, while fuzzy logic aids in risk analysis, project management, and cost estimation. Expert methods can be integrated into information systems to provide consistent information necessary for the effective management of construction projects. A review of published papers on the application of expert methods in construction shows that these methods are already significantly represented across all sectors of the construction industry, but also indicates that there are still substantial opportunities for their future application.

### Key words:

civil engineering, expert systems, artificial neural networks, genetic algorithms, fuzzy logic

## 1. Uvod

Građevinarstvo je složen sektor koji se svakodnevno suočava s brojnim izazovima i problemima tijekom svih projektnih faza [1]. Velike građevinske tvrtke sve više ulažu u implementaciju ekspertnih metoda kako bi lakše i brže stekli konkurentsku prednost na tržištu rada [2, 3]. Niska produktivnost rada tijekom građevinskih procesa predstavlja značajan problem s obzirom na ekonomsku važnost građevinskog sektora. Taj problem rezultira nedjelotvornim korištenjem radne snage, materijalnih resursa i financijskih sredstava [4]. Građevinske aktivnosti imaju ključnu ulogu u ekonomiji društva, stoga je važno usredotočiti se na poboljšanje upravljanja građevinskim procesima kako bi se povećala produktivnost i poboljšala ukupna učinkovitost proizvoda [5]. U tom kontekstu građevinski sektor prolazi kroz stalne inovacije prema digitalizaciji kako bi ostvario značajan napredak u automatizaciji, produktivnosti i pouzdanosti. S ciljem pokretanja stvarnih digitalnih strategija u građevinskom inženjeringu, ekspertne metode služe kao temelj za transformaciju načina izvođenja građevinskih projekata. Iako dolazi do znatnog povećavanja količine inženjerskih podataka u građevinskim projektima, usvajanje ekspertnih metoda još uvijek zaostaje u odnosu na druge industrije [4]. Stoga postoji golem interes za implementaciju različitih ekspertnih metoda u području građevinarstva kako bi se iskoristila vrijedna prilika digitalne evolucije za bolju učinkovitost i profitabilnost.

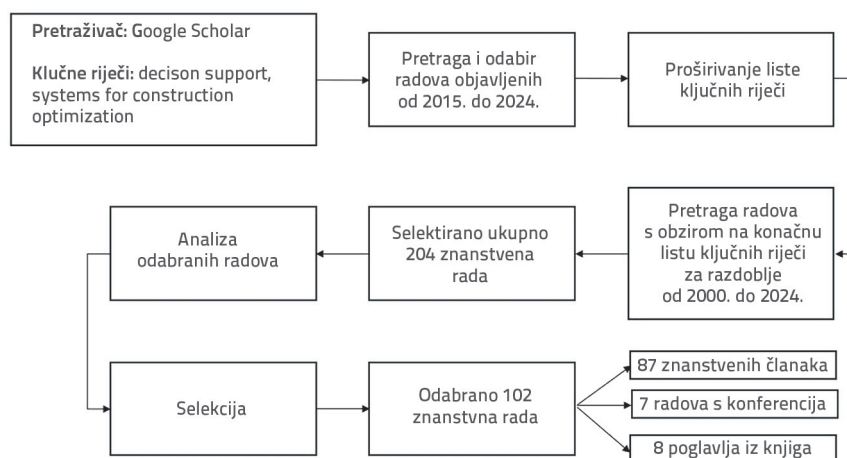
Uvod ekspertnih sustava u različite industrije dogodio se tijekom 70-ih i 80-ih godina prošlog stoljeća, kada su postali važni alati za rješavanje specifičnih problema. Prvi komercijalno uspješan ekspertni sustav, XCON, razvijen je na Sveučilištu Carnegie Mellon kako bi pomogao Digital Equipment Company (DEC) u konfiguriranju njihovih VAX računalnih sustava [6]. Razvoj ekspertnih sustava bio je ubrzan, s mnogim tvrtkama koje su započele vlastite projekte. Na primjer, DuPont je do 1988. razvio 100 ekspertnih sustava, ostvarujući značajne operativne uštede [7]. Ti sustavi su brzo postali ključni u različitim industrijama, uključujući i građevinarstvo, pružajući sofisticirane alate za rješavanje složenih inženjerskih problema i optimizaciju procesa.

U radu je dan pregled primjene ekspertnih sustava kod održavanja građevina, inspekcija kanalizacionih i vodovodnih sustava, geotehničkog inženjerstva, prometnica te odabira odgovarajućih građevnih materijala. Analiza istraživanja naglašava da korištenje neuronskih mreža omogućuje brzu i preciznu obradu

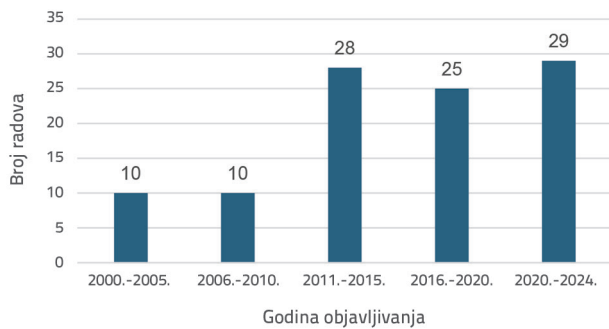
podataka, što rezultira djelotvornim predviđanjem budućih troškova i smanjenjem rizika od financijskih neusklađenosti. Rad predstavlja primjenu neuronskih mreža u kontekstu građevinske industrije, fokusirajući se na njihovu sposobnost preciznog predviđanja troškova, trajanja aktivnosti, produktivnosti radne snage te odabira izvođača građevinskih radova. Nadalje, rad ističe različite primjene fuzzy logike u građevinarstvu, od modeliranja radnih rizika na gradilištu, identifikacije uzroka kašnjenja projekata do predviđanja konačnih troškova projekata. Na kraju rada istražuje se primjena genetskih algoritama kod alokacije resursa, planiranja projekata, odabira optimalnih rješenja te održavanja građevina.

## 2. Metodologija

Slika 1. prikazuje metodologiju istraživanja ovog rada. Za pretraživanje literature u ovoj studiji korišten je Google Scholar, koji sadrži većinu objavljene akademske i znanstvene literature. Tijekom procesa odabira odgovarajućih ključnih riječi, najprije se na Google Scholaru pretraživao pojam "decision support systems for construction optimization". Nakon toga, odabrano je nekoliko znanstvenih radova u periodu od 2015. do 2024. godine kako bi se dodatno identificirale i proširile ključne riječi i istraživački pravci, te kako bi se omogućilo detaljno istraživanje aktualnih metoda u tom području. S obzirom na konačnu listu ključnih riječi, ukupno su identificirana 204 rada koja su relevantna za temu. Nakon temeljitog pregleda odabranih radova, provedena je dodatna selekcija, pri čemu je za detaljniju analizu i pregled odabrano 102 rada koja su najviše usklađena s ciljevima, a to uključuje 87 znanstvenih članaka, 7 radova s konferencija te 8 poglavlja u knjigama. Slika 2. prikazuje distribuciju broja radova upotrijebljenih u radu prema vremenskim periodima u kojima su objavljeni. 80 korištenih radova objavljeno je u periodu od 2011. do 2024. godine.



Slika 1. Metodologija istraživanja

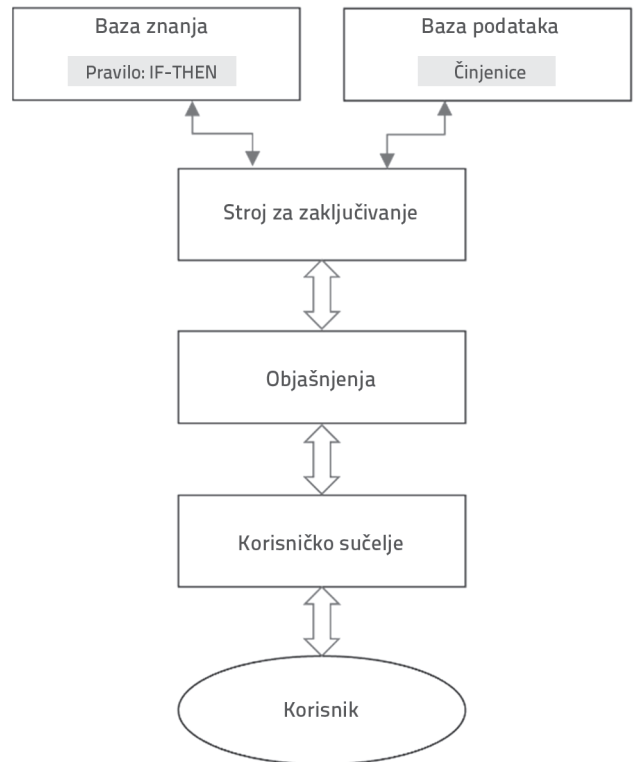


Slika 2. Prikaz broja radova upotrijebljenih u radu prema vremenskim periodima u kojima su objavljeni

### 3. Temeljne karakteristike ekspertnih sustava

Ekspertni sustavi fokusiraju se na pronalaženje rješenja za izazovne situacije koje su često teško rješive klasičnim metodama [8]. Tijekom proteklih 50 godina istraživači iz područja računarstva ostvarili su značajne uspjehe u razvoju tehnologije ekspertnih sustava kako bi se nosili sa stvarnim, dinamičnim problemima koji zahtijevaju brze i precizne odgovore, a često su izazovni za tradicionalne pristupe rješavanju problema [5]. Najučestalija struktura ekspertnih sustava temelji se na sustavima zasnovanim na pravilima, poznatim i kao sustavi za proizvodnju. Ova vrsta sustava primjenjuje znanje koje je formulirano kroz produkcijska pravila, koristeći "IF-THEN" logiku [9].

Na slici 3. je prikazano kako različite komponente sustava za obradu znanja međusobno integriraju. Baza znanja, koja sadrži pravila (npr. IF-THEN), i baza podataka, koja sadrži činjenice, povezane su s motorom za zaključivanje. Stroj za zaključivanje koristi pravila i činjenice za donošenje zaključaka. Informacije se zatim šalju korisniku putem korisničkog sučelja. Također postoji veza između objašnjenja i stroja za zaključivanje, što upućuje na to da sustav može objasniti kako su zaključci doneseni. Na kraju, korisnik interaktira sa sustavom putem korisničkog sučelja. Strjelice na dijagramu pokazuju tok informacija ili smjer interakcije među ovim komponentama.



Slika 3. Komponente ekspertnog sustava [9]

Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostatke ekspertnih sustava. Zbog mogućnosti samoprogramiranja, ekspertni sustavi omogućuju korisnicima izgradnju sustava bez potrebe za programerima, omogućujući brži i učinkovitiji razvoj aplikacija. Njihova sposobnost primjene pravila na opsežne skupove informacija osigurava pouzdanost, dosljednost i transparentnost. Ekspertni sustavi su skalabilni i brzo se ažuriraju, sposobni su nositi se s malo znanja i sposobni su dati odgovore u složenim situacijama. Ekspertni sustavi imaju značajnije nedostatke. Osmišljeni su za rješavanje određenog raspona problema, što ih čini neprikladnim za općenitije scenarije. Visoki troškovi razvoja, implementacije i održavanja doprinose njihovoj ograničenoj primjenjivosti. Ekspertnim sustavima često nedostaje intuitivno

Tablica 1. Prednosti i nedostaci ekspertnih sustava [9]

Prednosti ekspertnih sustava	Nedostaci ekspertnih sustava
Brza dostupnost i mogućnost samoprogramiranja	Pokrivaju samo uski spektar
Skalabilnost	Visoka cijena
Pouzdanost i dosljednost	Nedostatak intuitivnog rasuđivanja
Sposobnost iskorištavanja znatne količine znanja	Nemogućnost prilagođavanja promjenjivim okruženjima
Robusnost i učinkovitost	Ovise o simboličkom unosu
Transparentnost	Pogreške u bazi znanja

razmišljanje i mogu sadržavati pogreške u bazi znanja koje rezultiraju netočnim izborima. Nadalje, zbog fiksne baze znanja, teško se prilagođavaju promjenjivim situacijama bez kontinuiranog ažuriranja. Oslanjaju se na simbolički unos, što ograničava njihovu sposobnost razumijevanja dvosmislenih ili nepotpunih podataka.

#### 4. Pregled primjene ekspertnih sustava u građevinarstvu

U suvremenom građevinskom sektoru, gdje su projekti sve složeniji i zahtijevaju visoku razinu preciznosti, ekspertni sustavi postaju neizostavan alat za upravljanje i optimizaciju procesa. Primjena ekspertnih sustava u građevinarstvu može obuhvatiti različite aspekte, od projektiranja i planiranja do izgradnje i održavanja [10]. Na primjer, ti se sustavi mogu koristiti za optimizaciju rasporeda resursa, predviđanje troškova projekta, analizu rizika, održavanje infrastrukture i mnoge druge aplikacije. Njihova sposobnost pružanja brzih, točnih i učinkovitih rješenja često nadmašuje tradicionalne metode, čime pridonose napretku i djelotvornosti u građevinskoj industriji [11]. U daljnjem dijelu rada analizirana je primjena ekspertnih sustava u područjima održavanja građevina, kanalizacijskih i vodoopskrbnih sustava, geotehničkog inženjerstva, prometnica te u procesu odabira materijala.

Tijekom faze održavanja, timovi za održavanje građevina često troše znatno vrijeme prikupljajući informacije iz različitih elektroničkih podataka i tiskanih dokumenata. Stalno se ponavljaju aktivnosti pretraživanja, sortiranja, provjere i ponovnog stvaranja informacija [12]. Minimiziranje utjecaja problema zahtijeva besprijekornu elektroničku razmjenu podataka kako bi timovi za održavanje građevina imali sveobuhvatnu i točnu bazu podataka [13]. Ekspertni sustavi znatno mogu poboljšati i ubrzati proces održavanja objekata. Podkategorija koja se istražuje u ovom području je integracija informacija, koristeći različite tehnike kao što su: relacijska baza podataka i podaci u stvarnom vremenu [14, 15], skladište podataka [16], cloud tehnologija [17], web usluge koje se temelje na korištenju agenata [18], ontologija semantičkog weba [19] te primjena tehnika rudarenja podataka za ekstrakciju korisnih informacija iz BIM modela (skr. od eng. *Building information modeling*, hrv. informacijsko modeliranje građevina) kako bi se podržale aktivnosti tijekom faze održavanja [20].

Ostala istraživanja usmjerena su na integraciju različitih tehnoloških platformi. Na primjer izvlačenje informacija temeljeno na interakciji informacijskog modeliranja građevina i geografskih informacijskih sustava (eng. *Geographical information systems* - GIS) [20, 21], integraciji 2D barkoda i mobilnih uređaja [23] te integraciji BIM-a s radiofrekvencijskom radijacijom (eng. *Radio-frequency identification* - RFID) [24, 25].

BIM i GIS slični su u tome što modeliraju prostorne informacije [26, 27]. Kako bi se omogućila interakcija BIM-a i GIS-a, potrebna je njihova kompatibilnost koja se ostvaruje putem odgovarajuće platforme [28-30] predstavljaju koncept održavanja urbanih

infrastrukturnih objekata. Za integraciju podataka iz BIM i GIS sustava korištena je ACTIVE3D platforma. Kroz koncept održavanja urbanih infrastrukturnih objekata, integracija BIM-a i GIS-a kroz ACTIVE3D platformu omogućava modeliranje svih relevantnih informacija o gradu, uključujući i geografske elemente. Kang i Hong [31] predlažu BG-ETL platformu za učinkovitu integraciju podataka iz BIM-a i GIS-a. Podaci su raspoređeni prema njihovim informacijama i geometriji. Kako bi se omogućila vizualizacija brojnih objekata prikazanih putem geografskog informacijskog sustava, model je prilagođen pomoću geometrijskih podataka iz razmjene podataka u građevinskoj industriji (eng. *Industry foundation classes* - IFC), a informacije o svojstvima izdvojene su i transformirane. Rezultati istraživanja [27, 29-32] pokazuju da ovakvi ekspertni sustavi pružaju jasnije percipiranje odnosa između elemenata, smanjuju opterećenje memorije i poboljšavaju performanse sustava, što je ključno za velike projekte koji sadrže puno podataka, bolje povezivanje podataka iz različitih izvora te pružaju semantičke upute za prilagođene 3D prikaze čime omogućavaju preciznu analizu.

Istraživanja [33-36] opisuju računalni sustav koji integrira elemente modela građevine koristeći informacijsko modeliranje građevina i radiofrekvencijsku identifikaciju kako bi se unaprijedile performanse održavanja građevina. Radiofrekvencijske oznake pričvršćuju se na elemente zgrade, svaka oznaka sadržava određene informacije o tom elementu koje su preuzete iz BIM baze podataka. Osoblje može bilježiti informacije kao što su uvjeti, opisi problema koji su se pojavili tijekom održavanja, rezultati inspekcije, preporuke i datumi. Istraživanja [33-36] pokazuju da se uz minimalne napore u implementaciji predloženog sustava može postići značajno poboljšanje u procesu održavanja građevina u usporedbi s tradicionalnim metodama, što se odražava u uštedama vremena, troškova i poboljšanoj funkcionalnosti [34, 35]. Kameli i sur. [34] na temelju provedenog istraživanja tvrde da je ostvareno smanjenje ukupnih troškova za više od 50 % tijekom procesa održavanja.

Lin i sur. [37] u svom istraživanju predstavljaju proces održavanja građevine koji uključuje dvodimenzionalni (2D) barkodni sustav i BIM sustav. Sustav pruža platformu pomoću koje se dijele informacije o održavanju građevine. U okviru istraživanja uspoređena je tradicionalna metoda s predloženim sustavom, a rezultati provedenog istraživanja jasno pokazuju da je vrijeme potrebno za osnovne aktivnosti održavanja građevine uporabom BIM i 2D barkodnog sustava značajno smanjeno.

U kontekstu održavanja funkcionalnosti i stabilnosti urbanih infrastrukturnih sustava, inspekcija kanalizacijskih sustava je nezaobilazna procedura. Važno je redovito nadzirati i održavati mrežu odvoda kroz koje prolazi velika količina otpadnih voda, s ciljem izbjegavanja mogućih neželjenih posljedica poput curenja, začepjenja ili čak ekoloških katastrofa. Stručnjaci koriste različite tehnike i metode za ocjenu stanja i funkcionalnosti kanalizacijskih sustava, identificirajući potencijalne probleme i poduzimajući odgovarajuće mjere za osiguranje dugoročne učinkovitosti.

Hahn i sur. [38] su kreirali ekspertni sustav za određivanje prioriteta u inspekciji sustava odvodnje. Taj sustav procjenjuje potencijalne rizike i moguće posljedice, predlaže odgovarajuće metode inspekcije te upozorava korisnika kada su potrebne dodatne informacije za donošenje preciznijih odluka.

U istraživanju [39] razvijen je ekspertni sustav SCRAPS. Četiri javne institucije zajednički su razvile skup analiza za sustave odvodnje, prikupivši tri analize slučaja iz svog iskustva. Analize su se usmjerile na identifikaciju rizika i mehanizme neuspjeha. Stručnjaci su ocjenjivali rizike uz različite stupnjeve vjerojatnosti, a kritičnost je određena ponderiranim faktorima. Na temelju toga, kanalizacijski sustavi su kategorizirani prema riziku. Ovaj proces je testirao točnost softvera SCRAPS i omogućio stručnjacima bolje planiranje održavanja i upravljanja odvodnim sustavima, poboljšavajući učinkovitost i smanjujući rizik od neuspjeha. Giovanelli i Maglionicio [40] također koriste SCRAPS sustav za predviđanje kritičnih segmenata kanalizacijske mreže. U SCRAPS bazu podataka uneseni su podaci o promjeru cijevi, učestalosti poplava, prodiranju korijenja, nakupljanju sedimenta, koroziji, starosti cijevi, razini podzemnih voda, dubini cijevi i drugim relevantnim parametrima. Dokazano je da kombinacija SCRAPS-a i hidrauličkog modeliranja može biti izuzetno korisna za procjenu podataka o kanalizacijskom sustavu i za planiranje potrebnih inspekcija kako bi se održala stalna razina funkcionalnosti sustava.

Autori Ana i Bauwens [41] istaknuli su sustav APOGEE (skr. od franc. *Analyses et Programmation Optimise pour la Gestion, L'Entretien et L'Exploitation du Reseaux d'Assainissement*, hrv. analiza i optimizirano programiranje za upravljanje, održavanje i eksploataciju mreža za pročišćavanje otpadnih voda), razvijen za optimizaciju godišnjeg planiranja i obnove kanalizacijske mreže. Taj sustav, koji se sastoji ekspertnog sustava, baze podataka i modula za planiranje intervencija i popravaka, doprinosi građevinskoj industriji poboljšanjem učinkovitosti održavanja, smanjenjem troškova i produženjem vijeka trajanja infrastrukture. Tagherout i sur. [42] u svom istraživanju razvili su ekspertni sustav koji pomaže u obnovi kanalizacijskih cijevi na način da predlaže prioritete u obnovi kanalizacijskih cijevi. Indeks svojstava proračunan je za svaki segment mreže. Pri izračunu u obzir su uzeta tri ključna svojstva: hidraulička, strukturna i globalna. Pomoću indeksa svojstava detektiraju se informacije o stanju kanalizacijskih cijevi, o okruženju u kojem se nalazi kanalizacijska cijev i hidrauličkim karakteristikama cijevi. Precizna klasifikacija pruža prednosti u donošenju odluka o tome koje kanalizacijske cijevi treba obnoviti. Prednost ovog sustava ocjenjivanja nije samo u uključivanju raznovrsnih parametara, već i u istraživanju načina na koji oni međusobno djeluju.

Kada je riječ o upravljanju vodoopskrbnim sustavima ono predstavlja izazov jer operateri moraju brzo reagirati na promjene u potražnji i održavati stabilne uvjete. Dok se mnoge odluke donose na temelju iskustva i intuicije, matematički modeli pomažu u optimizaciji sustava uzimajući u obzir različite parametre poput potrošnje vode, tlaka, kvalitete vode i energetske učinkovitosti [43].

Leon i sur. [44] u svom radu predstavljaju ekspertni sustav EXPLORE. Sustav koji je razvijen kako bi pomogao u upravljanju vodoopskrbnom mrežom. Njegovi glavni ciljevi su: svakodnevno analizirati potražnju vode i prilagođavati protok kako bi se osiguralo dovoljno vode bez nepotrebnog gubitka ili prekomjerne potrošnje, pratiti i prilagođavati protok vode u spremnicima, održavajući optimalnu razinu uzimajući u obzir dnevnu potražnju te optimizirati upotrebu crpki kako bi se smanjili troškovi električne energije što doprinosi održivosti sustava. Studija ističe da je ostvareno značajno smanjenje troškova električne energije, ostvarivši uštedu od 25 % [44].

Moglija i sur. [45] razvili su sustav za prioritiziranje pregleda vodovodnih cijevi (PARMS-PRIORITY) kako bi pomogao u donošenju odluka o popravcima i obnovi cijevi. Sustav se sastoji od pet modula: izračun rizika, predviđanje kvarova, procjena troškova, evaluacija scenarija i istraživanje podataka. Rizik se računa kao kombinacija vjerojatnosti kvara i povezanih troškova. Glavne prednosti sustava PARMS-PRIORITY su što prikazuje predviđanja kvarova i troškova za pojedinačne cijevi ili cijeli sustav, omogućujući korisnicima da odrede koje cijevi treba najprije obnoviti. U integraciji je s GIS sustavom koji olakšava brzo pronalaženje problematičnih područja i pruža detaljne informacije o cijevima, poput promjera, duljine i tipa tla.

Fares i sur. [46] predstavljaju ekspertni sustav za procjenu rizika od pucanja vodovodnih cijevi. Taj ekspertni sustav sastoji se od četiri ključne kategorije: fizičkih čimbenika, operativnih čimbenika, utjecaja na okoliš te posljedica, a svaka kategorija obuhvaća faktore rizika koji utječu na vjerojatnost pucanja vodovodnih cijevi. Predloženi ekspertni sustav omogućuje inženjerima detaljnu analizu i procjenu svakog segmenta vodovodnih cijevi, pružajući konkretne informacije o riziku te preporuke za prioritete u održavanju vodovodnih cijevi.

Sandeep i Rakesh [47] razvili su sustav koji koristi simulacije kako bi generirao znanje za rješavanje raznih situacija u stvarnom vremenu tijekom održavanja vodovodnih sustava. Integrira hidrauličko modeliranje s ekspertnim znanjem koristeći jedinstvenu platformu CLIPS. Također, integrira računalne platforme poput MATLAB-a, GIS-a i RDBMS-a pod jednostavnim korisničkim sučeljem. Rezultati istraživanja pokazuju da je predloženi sustav sposoban za napredno modeliranje, kalibraciju i simulaciju vodovodnih sustava, pružajući dinamičan pristup upravljanju vodovodnih mreža.

Karasneh i Moqbel [48] razvili su sustav odlučivanja za prioritizaciju obnavljanja vodovodnih cijevi. Na temelju mišljenja 23 stručnjaka, identificirano je pet glavnih kategorija koje dominiraju u procesu donošenja odluka: fizički, okolišni, operativni, sociokulturni i kvaliteta usluge. Razvijeni sustav testiran je na pet vodovodnih mreža koje su zahtijevale obnovu u Amanu, Jordanu. Rezultati testiranja su pokazali da je sustav uspješno pružio jasan popis prioriteta obnove vodovodnih mreža.

Ekspertni sustavi pronašli su značajnu primjenu u geotehničkom inženjerstvu. Ovaj segment rada pruža pregled njihove primjene u različitim aspektima geotehničkog inženjerstva, kao što je



analiza stabilnosti nagiba, analiza čimbenika koji uzrokuju pojavu klizišta, lociranje klizišta, odabir učinkovitije metode za sanaciju urušenih kosina te predviđanje suhe gustoće tla.

Fizički temeljeni modeli često se primjenjuju za analizu stabilnosti nagiba kako bi se spriječila potencijalno katastrofalne posljedice klizanja. Međutim, primjena takvih modela može biti vrlo vremenski zahtjevna, a zbog njihove dvodimenzionalne prirode obično se mora ponavljati za svaki segment koji se istražuje [49, 50]. U ovom istraživanju [51], sustav CHASM (skr. od eng. *Combined Hydrology and Stability Model*, hrv. model integrirane hidrologije i stabilnosti) implementiran je unutar geografskog informacijskog sustava. Korisnici mogu odabrati različite ulazne podatke, uključujući informacije o oborinama, karakteristikama tla, infiltraciji, topografskim podacima. Ovaj ekspertni sustav omogućuje brzu analizu stabilnosti nagiba bez potrebe za detaljnom pripremom podataka. Rezultati simulacija automatski se pohranjuju u bazu podataka i mogu se prikazati vizualno kako bi se lakše interpretirali.

Muthu i Petrou [52] predstavljaju ekspertni sustav koji identificira čimbenike koji potiču klizišta. Prvi dio sustava obuhvaća stalne faktore kao što su geološke karakteristike, povijest klizišta i druge trajne uvjete na određenom mjestu. Na temelju tih faktora sustav procjenjuje potencijalnu ozbiljnost klizišta. Drugi dio sustava fokusira se na promjenjive faktore kao što su oborine i promjene u korištenju zemljišta. Ti promjenjivi faktori koriste se za stvaranje bodovnog sustava koji identificira koji čimbenici potiču klizišta.

U radu [53] predstavljen je ekspertni sustav za procjenu pojave klizišta koji koristi podatke sa SPOT (skr. od franc. *Satellite Pour l'Observation de la Terre*, hrv. satelit za nadzor Zemlje) snimaka. Na temelju tih snimaka sustav gradi bazu podataka koja sadrži informacije o lokacijama klizišta, njihovim karakteristikama (veličina, oblik) te uvjetima okoliša. Ekspertni sustav analizira te podatke kako bi identificirao područja s visokim rizikom od klizišta te omogućuje brzu identifikaciju potencijalno opasnih područja.

U ovom istraživanju [54] korišten je ekspertni sustav za stvaranje karte koja pokazuje gdje je najveća vjerojatnost pojave klizišta na otoku Lefkadi u Grčkoj. Baza podataka stvorena je analizom podataka dobivenih iz terenskih istraživanja kao što su: litološke jedinice, nagib terena, orijentacija nagiba, udaljenost od hidrografske mreže i udaljenost od prometnih mreža.

Adhikari i sur. [55] razvili su sustav čiji je zadatak preporučiti najprikladniju metodu sanacije urušenih kosina. Koristi se za rangiranje različitih metoda sanacija na temelju definiranih kriterija u sustavu kao što su: utjecaj na promet, trajnost i brzina izvedbe. Važnost kriterija odabira određene metode izračunana je primjenom metode entropije. Na temelju prikupljenih podataka od stručnjaka i važnosti svakog navedenog kriterija, sustav koristi tehniku za preferencijalno rangiranje po sličnosti idealnog rješenja kako bi odabrao učinkovitiju metodu za sanaciju urušene kosine.

Albusoda i sur. [56] u svom radu koristili su ekspertni sustav podržan programskim jezikom MATLAB za predviđanje suhe

gustoće tla. Za stvaranje sustava korišteni su ulazni podaci: granica tečenja, granica plastičnosti, indeks plastičnosti, udio vlage, specifična težina, točnost prosijavanja finih čestica, ukupne suspendirane čestice i organski materijali. Rezultati su pokazali da su predviđanja dobivena primjenom ekspertnog sustava bila vrlo bliska stvarnim eksperimentalnim podacima.

U posljednjih nekoliko desetljeća, ekspertni sustavi su postali ključni alati u različitim disciplinama građevinarstva, uključujući izgradnju i održavanje prometnica. Ti sustavi imaju važnu ulogu u rješavanju specifičnih izazova s kojima se susreću inženjeri prometnica, koji variraju ovisno o različitim uvjetima i okolnostima na terenu. Jedinstveno inženjersko iskustvo je presudno za prepoznavanje tih izazova i preporuku optimalnih rješenja, što često nije dostupno na svim gradilištima.

Mosa i sur. [57] u svom radu predstavljaju ekspertni sustav u kojem je baza podataka pohranjena u obliku pravila i kodirana u Microsoft Visual Basic-u, podržana GIS-om koji je kompatibilan s Visual Basic-om. Razvijeni sustav nazvan ES-CCPRHP predstavlja sustav baze znanja za upravljanje problemima u izgradnji krutih prometnih kolnika. Sustav je prošao kroz temeljitu provjeru i validiran na tri načina: detaljnim testiranjem, usporedbom rezultata sustava s procjenama stručnjaka i analizom kroz studije slučaja. Može se koristiti kao baza podataka za arhiviranje problema koji se javljaju u praksi prilikom izgradnje krutih kolnika te za dijeljenje iskustava inženjera i prijenos informacija na buduće generacije inženjera.

Milad i sur. [58] razvili su ekspertni sustav koji pomaže u održavanju prometnica u tropskim područjima. Sustav je temeljen na znanju i podacima koje su pružili inženjeri čije je specifično područje stručnosti održavanje prometnica i inženjeri koji se bave projektiranjem prometnica. Korištena je tehnika IF-THEN za donošenje preporuka, a sustav je programiran u PHP-u (skr. od eng. *Hypertext Preprocessor*, hrv. hiperskriptni procesor). Korisničko sučelje sustava izgrađeno je pomoću HTML-a (skr. od eng. *Hypertext Markup Language*, hrv. prezentacijski jezik za izradu web stranica) i CSS-a (skr. od eng. *Cascading Style Sheets*, hrv. stilski jezik za opis prezentacije dokumenta).

Al-Mansour i sur. [59] razvili su sustav koji pomaže u odabiru najprikladnijih metoda održavanja prometnica u Saudijskoj Arabiji. Korisnik sustava ima mogućnost definirati kriterije kao što su: razina prometa, vremensko razdoblje analize i kritična vrijednost za procjenu stanja prometnice.

Pereira i sur. [60] bave se razvojem ekspertnog sustava za prioritarno određivanje dionica autocesta u Brazilu koje zahtijevaju popravke. Istraživanje je provedeno kako bi pomoglo vlastima u raspodjeli sredstava za 20.315 km autocesta. Sustav rangira segmente autocesta prema njihovom geografskom položaju i operativnim karakteristikama, uzimajući u obzir socio-ekonomske i demografske podatke, transportnu infrastrukturu, promet, kapacitet autocesta, stanje kolnika, odvodnju i vremenske uvjete. Stručnjaci su sudjelovali u određivanju težinskih faktora za prioritizaciju sredstava. Sustav je pouzdan i pruža podatke za podršku donošenju odluka, a metodologija se može primijeniti i u drugim regijama.

U suvremenom građevinarstvu, implementacija ekspertnih sustava za odabir građevnih materijala ima ključnu ulogu u optimizaciji procesa izgradnje i održavanja te postizanju visokih standarda održivosti i učinkovitosti.

Jadid i Badrah [61] implementirali su ekspertni sustav koji se fokusira na pitanja odobravanja materijala, kriterija odabira i upravljanja informacijama o materijalima s ciljem poboljšanja razmjene znanja među inženjerima građevinarstva. Sustav se sastoji od baze podataka i komponenata za odlučivanje koje se oslanjaju na metodu optimizacije vrijednosti. Baza podataka poboljšava proces odabira pružajući ključne informacije o kvaliteti, trajnosti i održavanju materijala.

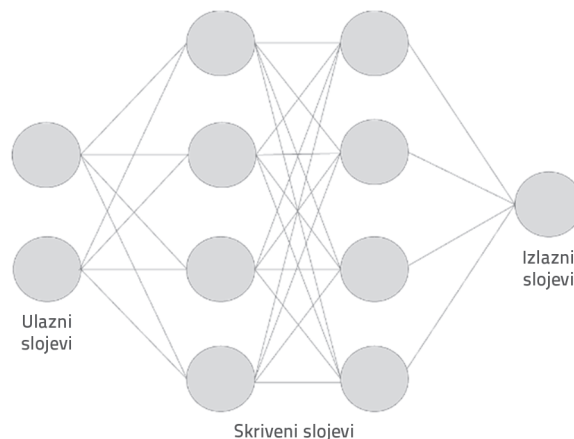
Yang i Ogunkah [62] predstavljaju ekspertni sustav koji pomaže u odabiru materijala kod izgradnje ekološko održivih objekata (zeleni objekti) s obzirom na kriterije poput troškova, trajnosti, ekoloških utjecaja, energetske učinkovitosti, dostupnosti i estetike. Sustav omogućuje pohranu, upravljanje i integraciju podataka o materijalima, koristeći analitički hijerarhijski proces. Baza podataka razvijena je na temelju povratnih informacija od strane stručnjaka, pregleda literature te povratnih informacija od strane građevinskih tvrtki, a upravljanje bazom podataka moguće je putem MS Excela.

Akadiri i sur. [63] u svom radu dotakli su se problema odabira građevnih materijala koji su održivi, tj. materijali koji trebaju imati pozitivan utjecaj na okoliš, smanjiti potrošnju resursa, minimizirati otpad, imati prihvatljive troškove tijekom svog životnog vijeka te zadovoljiti visoke standarde funkcionalnosti i trajnosti. Za svaki od tih ključnih faktora koristi se analitički hijerarhijski proces koji omogućuje težinsko numeričko vrednovanje svakog faktora. Na temelju numeričke evaluacije, sustav može dati konkretne prijedloge i preporuke o tome koji materijal je najbolji izbor u kontekstu specificiranog projekta ili zadatka.

#### 4.1. Umjetne neuronske mreže

Umjetna neuronska mreža (eng. *Artificial neural network* - ANN) stvorena je prema uzoru na biološku neuronsku mrežu. Poput biološke neuronske mreže, umjetna neuronska mreža se sastoji od čvorova koji su povezani na način sličan neuronima [64]. Svaka neuronska mreža ima tri ključne komponente: karakteristike čvora, topologiju mreže i pravila učenja [65]. Umjetna neuronska mreža stječe znanje putem procesa učenja. Postoje dva osnovna načina učenja: nadzirano i nenadzirano, a različite neuronske mreže koriste različite strategije učenja, ovisno o tome koje zadatke trebaju riješiti [66].

Slika 4. prikazuje arhitekturu umjetne neuronske mreže. Čvorovi u neuronskim mrežama su organizirani u slojeve, pri čemu se razlikuju tri glavna tipa: ulazni, izlazni i skriveni slojevi. Ulazni slojevi umjetne neuronske mreže predstavljaju početnu točku i služe za unos podataka, skriveni slojevi služe za obrađivanje podataka, a izlazni slojevi predstavljaju krajnje rezultate obrade.



Slika 4. Arhitektura umjetne neuronske mreže [67]

Učinkovito financijsko upravljanje ključ je za nesmetano izvođenje i pravovremeni završetak građevinskog projekta. Loše financijsko upravljanje može uzrokovati dodatne troškove koji stvaraju ozbiljne probleme za izvođače i investitore, a u nekim slučajevima može dovesti do prekida radova zbog nedostatka resursa. Pomoću neuronskih mreža pruža se brza i precizna analiza podataka, što omogućava djelotvorno predviđanje budućih troškova i smanjenje rizika od financijskih neusklađenosti [68, 69].

ElSavy i sur. [70] predstavili su model neuronske mreže koja koristi algoritam povratnog širenja za predviđanje režijskih troškova gradilišta u Egiptu. Studija je koristila podatke iz 52 stvarna projekta koji su izvedeni između 2002. i 2009. godine za treniranje neuronske mreže. Rezultati su pokazali vrijednost srednje kvadratne pogreške od 0.2764 i razinu točnosti od 80 %. Uočeno je da je model pogrešno predvidio postotak režijskih troškova gradilišta za samo jedan projekt (20 %) iz testnog uzorka.

Moselhi i El-Sawah [71] koristili su neuronske mreže s algoritmom povratnog širenja, probabilističke neuronske mreže i generalizirane regresijske neuronske mreže te modele regresijske analize za procjenu troškova čeličnih konstrukcija. Rezultati istraživanja pokazali su da se srednja apsolutna postotna pogreška modela neuronskih mreža u granicama od 16,83 % do 19,3 %, a za regresijski model iznosila je 23,72 %. Linearni regresijski model bio je osjetljiviji na promjenu broja podataka za treniranje, dok je probabilistička neuronska mreža bila najstabilnija mreža među sva tri modela s maksimalnom razlikom u srednjoj apsolutnoj postotnoj pogrešci od 2,46 %.

Yadav i sur. [72] razvili su tehniku procjene troškova temeljenu na principima umjetne neuronske mreže za predviđanje strukturnih troškova stambenih zgrada. Prikupljeni su podaci troškova iz razdoblja od 1993. - 2016. godine za treniranje mreže. Prikupljeni parametri uključivali su troškove cementa, pijeska, čelika, agregata, kvalificiranih i nekvalificiranih radnika. Parametri su simulirani korištenjem NEURO XL verzije 2.1. Neuronski model predvidio je ukupne strukturne troškove građevinskih projekata s koeficijentom korelacije (R) od 0.9960.

Pessoa i sur. [73] predstavili su model neuronske mreže predviđanja troškova koji se sastoji od 11 varijabli, a to su visina zgrade, prosječna visina između katova, prosječan opseg, korisna površina zgrade, površina krova, površina sanitarnih prostorija, vrijednost otvorenog prostora, broj katova, tipovi podnih konstrukcija, tipovi krovnih konstrukcija i temeljna ploča. Predstavljen je analitički model temeljen na višeslojnom perceptronu, sposoban za procjenu troškova izgradnje stambenih objekata.

Uvođenje umjetnih neuronskih mreža u planiranje izgradnje donosi napredne mogućnosti za precizno predviđanje trajanja i upravljanje aktivnostima. Primjena umjetnih neuronskih mreža u građevinarstvu obuhvaća predviđanje trajanja betonskih operacija, kao i razvoj alata za procjenu trajanja aktivnosti poput postavljanja armature i betoniranja.

Maghrebi i sur. [74] koristili su umjetnu neuronsku mrežu za predviđanje trajanja betonskih operacija, fokusirajući se na parametre lanca opskrbe gotovim betonom. Dostupna baza podataka obuhvaća dostave gotovog betona tijekom 4 mjeseca sa 17 skladišta i s više od 200 kamiona. Model precizno predviđa produktivnost betonskih operacija u rasponu od 8 do 15 m<sup>3</sup>/sat. Međutim, za niže produktivnosti (manje od 5 m<sup>3</sup>/sat) i više produktivnosti (više od 15 m<sup>3</sup>/sat), postoje veće varijacije u predviđanjima modela.

Golizadeh i sur. [75] predložili su alat za procjenu trajanja aktivnosti vezanih uz strukturne elemente zgrada s betonskim okvirom. Razvijena su četiri neuronska modela za izračun trajanja postavljanja armature stupova, armature greda, betoniranja stupova i betoniranja greda. Koeficijenti korelacije (R) za četiri modela - postavljanje armature stupova, betoniranje stupova, betoniranje greda i postavljanje armature greda iznosili su 0.9863, 0.9857, 0.9803 i 0.9604, što pokazuje na izvrsnu prediktivnu izvedbu modela.

Uvođenje umjetnih neuronskih mreža u analizu produktivnosti radne snage u građevinskoj industriji predstavlja značajan korak prema optimizaciji procesa. Korištenjem neuronske mreže za predviđanje produktivnosti, istraživači su identificirali i analizirali više faktora koji utječu na učinkovitost rada, uključujući dob radnika, iskustvo, uvjete na gradilištu, vremenske uvjete te dostupnost materijala i opreme.

Aswed [76] je koristio umjetnu neuronsku mrežu za predviđanje produktivnosti rada radnika na temelju trideset faktora. Kao ulazne varijable koristili su se faktori poput dobi, iskustva, zdravlja radne ekipe, broja radnika, plaća, vremenskih uvjeta, dostupnosti materijala, uvjeta na gradilištu, duljine zida, visine zida, vrste morta, debljine zida i sigurnosti na gradilištu. Model je s razumnom točnošću predviđao stvarnu produktivnost rada s koeficijentom korelacije R = 86,28 %. Studija zaključuje da se model može primijeniti za predviđanje produktivnosti rada u bilo kojoj vrsti građevinskih projekata koristeći navedene utjecajne faktore.

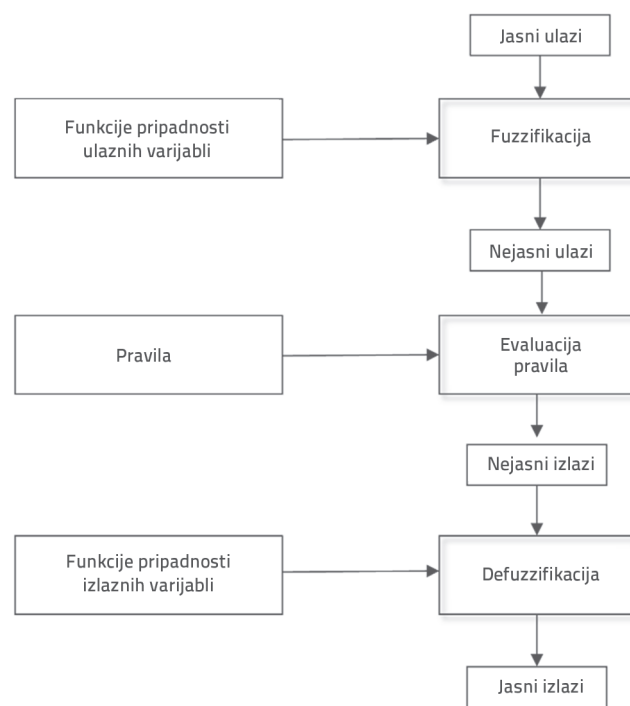
U radu [77] je predstavljen model neuronske mreže za procjenu produktivnosti radne ekipe u izvođenju završnih radova. Deset ključnih faktora uključujući dob, iskustvo, broj pomoćnih radnika, visinu poda, visinu zida, veličinu obloga, uvjete sigurnosti,

zdravstveno stanje radnog tima, vremenske uvjete, uvjete na gradilištu i dostupnost građevnog materijala korišteni su kao ulazne varijable. Rezultati su pokazali da mreža ima sposobnost predviđanja produktivnosti u izvođenju završnih radova s koeficijentom korelacije od 87,55 % i točnošću predviđanja od 90,9 %.

Odabir odgovarajućeg izvođača za projekt je ključan korak. Kako bi se bolje procijenila sposobnost izvođača, primjenjuje se neuronske mreže koje analiziraju informacije iz tenderske dokumentacije. Te informacije uključuju broj ponuda, usklađenost s uvjetima i financijsku stabilnost izvođača [78]. Za analizu se koristi višeslojni perceptron (eng. *multilayer perceptron* - MLP) preko NeuroSolution alata. Višeslojni perceptron se odnosi na određenu arhitekturu neuronske mreže koja se koristi za modeliranje podataka dok NeuroSolution alat predstavlja softverski alat koji omogućuje implementaciju višeslojnog perceptrona i provođenje analize podataka [79].

## 4.2. Fuzzy logika

Fuzzy logika je vrsta logike koja se razlikuje od klasične (bivalentne) logike jer omogućuje postojanje djelomične istine. Dok klasična logika koristi samo dvije vrijednosti - istina i neistina - fuzzy logika koristi kontinuirani spektar vrijednosti između 0 i 1 kako bi opisala koliko je neka tvrdnja istinita. Skupovi su osnovna komponenta fuzzy logike i predstavljaju način modeliranja nesigurnosti i nejasnosti [80, 81]. Fuzzy logika pruža moćan alat za modeliranje i rješavanje problema koji nisu crno-bijeli. Omogućuje nam da koristimo nejasne informacije kako bismo donijeli odluke i zaključke u situacijama gdje klasična logika može biti nedovoljna [82].



Slika 5. Koraci fuzzy logike [83]



Slika 5. prikazuje korake fuzzy logike. Jasni ulazi su konkretne vrijednosti koje unosimo u proces. Nakon toga slijedi proces fuzzifikacije gdje se jasni ulazi transformiraju u nejasne ulaze. U procesu evaluacije pravila nejasni ulazi transformiraju se u nejasne izlaze. U procesu defuzzifikacije nejasni izlazi transformiraju se u konačne rezultate, odnosno jasne izlaze koji predstavljaju odgovor sustava.

Procjena radnih rizika važna je za sigurnost radnika na gradilištima. Proces koristi različite parametre, ali često je teško dobiti precizne informacije. Tradicionalne metode često nisu dovoljno točne u određivanju rizika i predlaganju preventivnih mjera. Fuzzy logika je korištena za razvoj modela za procjenu radnih rizika [84]. Korištenjem naprednih tehnika zaključivanja i analize, model pruža alate koji pomažu građevinskim tvrtkama da donose informirane odluke i učinkovito upravljaju sigurnosnim rizicima [82].

Liu i Tsai [85] predlažu metodu koja koristi dvostupanjske tablice za primjenu funkcije kvalitete kako bi prikazala odnose između skupine građevinskih radova, vrste opasnosti i uzroka opasnosti. Fuzzy analitički mrežni proces primijenjen je kako bi se identificirale najvažnije vrste opasnosti i njihovi uzroci te procijenili koliko su ti uzroci rizični.

Janacković i sur. [86] u radu predlažu fuzzy analitički hijerarhijski proces za rangiranje kriterija koji se koriste za procjenu razine sigurnosti na gradilištu. Osnovni zahtjevi na kojima se temelji sigurnost na radu (rizik, troškovi i društvena odgovornost) identificirani su kao kriteriji, čimbenici koji utječu na kvalitetu sigurnosti na radu (tehnički, ljudski, organizacijski i vanjski okolišni čimbenici) kao podkriteriji, a ključni pokazatelji sigurnosti na radu identificirani su kao alternative. Provedena je studija slučaja na cestograditeljskim tvrtkama, a rezultati su pokazali da organizacijski faktori imaju najveći utjecaj na kvalitetu sustava upravljanja zaštitom zdravlja i sigurnosti na radu.

Seker i Zavadskas [87] predstavljaju novi pristup procjeni radnih rizika na gradilištu, koji pomaže voditeljima projekta da donesu odgovarajuće preventivne strategije za izbjegavanje nesreća na gradilištu. Predložena fuzzy metoda otkriva odnose između čimbenika i rangira kriterije prema vrsti odnosa i intenzitetu njihovih učinaka na svaki kriterij.

Fuzzy logika osim što se koristi za analizu rizika u radu, primjenjuje se kod upravljanja građevinskim projektima.

Kašnjenja građevinskih projekata su česta i neizbježna. Kada dođe do kašnjenja na nekoj aktivnosti, inženjer koji upravlja projektom treba utvrditi koliko dugo traje kašnjenje i kako to utječe na preostali dio plana projekta. Često se dogodi da iako inženjer koji upravlja projektom zna da postoji problem koji usporava rad na određenoj aktivnosti, možda neće moći precizno procijeniti koliko će to kašnjenje trajati, kakve će biti posljedice i hoće li to uzrokovati kašnjenje u konačnom završetku projekta. Zbog toga je korisno kod upravljanja projektima imati alate koji će pomoći u ažuriranju plana projekta na temelju analize kašnjenja.

Oliveros i Fayek [88] predstavljaju model fuzzy logike koji integrira dnevno izvještavanje s gradilišta o napretku aktivnosti

i kašnjenjima sa sustavom ažuriranja rasporeda te praćenja i kontrole građevinskih radova. Razvijeni model pomaže u analizi utjecaja kašnjenja na datum završetka projekta i sastoji se od nekoliko komponenti: baza podataka o izvedenom stanju integrirana s rasporedom projekta, popis potencijalnih uzroka kašnjenja, postupak kategorizacije kašnjenja, metoda procjene trajanja kašnjenja pomoću fuzzy logike, postupak ažuriranja rasporeda te postupak koji procjenjuje utjecaje i vjerojatne posljedice kašnjenja na napredak aktivnosti.

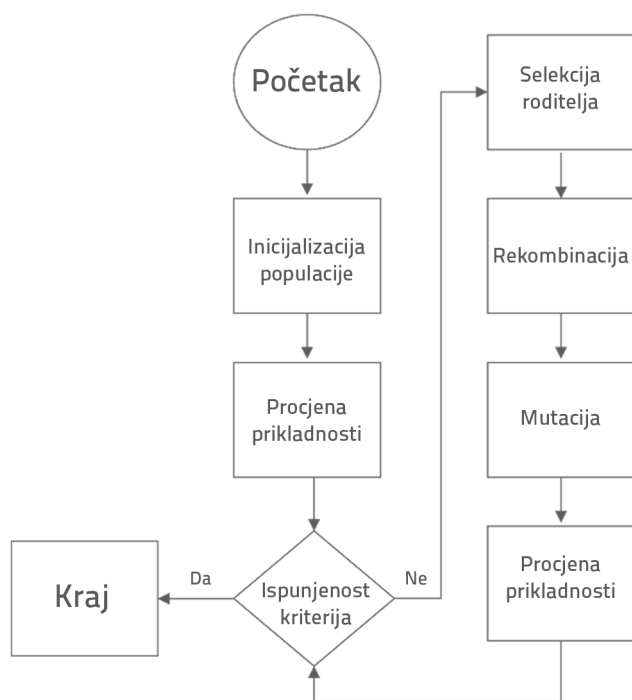
Gunduz i sur. [89] predstavili su alat u kojem je korištena fuzzy logika zajedno s metodom relativnog indeksa važnosti koji pomaže izvođačima građevinskih radova u procjeni vjerojatnosti kašnjenja projekta. Identificirana su 83 faktora koji mogu uzrokovati kašnjenja, podijeljenih u 9 glavnih grupa, temeljem pregleda literature i intervjua s građevinskim inženjerima. Važnost tih faktora je izmjerena pomoću metode relativnog indeksa, a faktori i grupe su rangirani prema tome koliko utječu na kašnjenje. Najvažniji faktori kašnjenja su analizirani prema rezultatima ovog projekta, a model je pokazao zadovoljavajuće rezultate.

Prekoračenje troškova u građevinskim projektima je vrlo česta pojava koja se javlja zbog nekvalitetnog i nedovoljno planiranja. Prekoračenje troškova može imati veliki učinak na financijsku strukturu projekta i vremenski okvir projekta, zbog toga je vrlo važno provoditi rane analize i kontrole troškova [90]. Karla i Aminah [91] razvili su model temeljen na fuzzy logici kreiran s ciljem da izračuna koliko će konačni troškovi projekta biti viši ili niži od ugovorene cijene. Model izvršava procjene na temelju karakteristika projekta. U obzir uzima čimbenike kao što su opsežnost, složenost i trajanje projekta te zahtjevi za resursima. Nadalje, model uzima u obzir potencijalne rizične događaje. Kašnjenja, nedostatak resursa, promjene u zahtjevima ili nepredviđene komplikacije samo su neki od primjera rizičnih događaja.

#### 4.3. Genetski algoritmi

Obično se pokušava pronaći najbolji odgovor među ograničenim brojem dostupnih izbora. Prostor pretraživanja odnosi se na skup svih zamislivih opcija. Svaka točka u tom području predstavlja potencijalno rješenje koje se može procijeniti na temelju stupnja prilagodljivosti. Genetski algoritmi su heurističke metode za istraživanje prostora u svrhu određivanja idealnog rješenja, kao što je na primjer minimizacija [92]. Međutim, prepreke u ovom kontekstu često uključuju prisutnost lokalnih minimuma i poteškoće s početnom točkom pretraživanja. Genetski algoritam ima nekoliko ključnih karakteristika. Prvo, to je stohastički algoritam, što implicira da uključuje neki element slučajnosti. Postupci odabira i replikacije algoritma uvelike se oslanjaju na slučajnost [93]. Primjenjujući načela prirodne selekcije, više rješenja mogu se spojiti kako bi se dobili vrhunski rezultati. Robusnost je još jedna važna značajka genetskih algoritama. Oni su nevjerojatno prilagodljivi i mogu se koristiti za rješavanje raznih problema bez dodatnih kriterija [94].

Slika 6. prikazuje radni proces genetskog algoritma koji započinje s nasumično generiranom populacijom rješenja. Odabir optimalnih rješenja iz populacije služe kao roditelji za stvaranje nove generacije rješenja. Zatim slijedi rekombinacija informacija kako bi se stvorila nova jedinka. Nakon toga provodi se proces mutacije kako bi se očuvala raznolikost populacije. Svaka jedinka ocjenjuje se prema kriterijima, a optimalno rješenje postaje izlaz genetskog algoritma. Ovaj proces provodi se iterativno dok se ne zadovolji kriterij zaustavljanja.



Slika 6. Radni proces genetskog algoritma [95]

Pravilna raspodjela resursa ključna je za uspjeh projekta i poboljšanje procesa. Alokacija resursa i niveliranje su kompleksni zadaci, posebno kada se trebaju istovremeno optimizirati [96]. Korištenje genetskog algoritma za rješavanje ovih problema provodi se u pet koraka: definiranje genetske strukture, postavljanje kriterija za evaluaciju gena, stvaranje početne populacije, odabir načina za generiranje novih generacija te implementacija postupka u računalnom programu. U radu [97] u predlaže se genetski algoritam koji poboljšava postojeće rasporede stvorene uz pomoć komercijalnih alata za upravljanje projektima.

Genetski algoritmi pronašli su svoju primjenu u raznim područjima optimizacije, uključujući i planiranje i upravljanje projektima u građevinarstvu. Zhang i sur. [98] razvijaju genetski algoritam za optimizaciju rasporeda zadataka s minimalnim troškovima projekta uzimajući u obzir deterministička i stohastička trajanja zadataka. Genetski algoritam generira raspored zadataka te izdaje smjernice za njihovo izvršenje kroz simulacije stohastičkih distribucija. Rezultati pokazuju da genetski algoritam može smanjiti ukupne troškove do 19,57 %

u determinističkim uvjetima. Također, može značajno smanjiti vrijeme izvršenja za oko 66 %. Altanany i sur. [99] predstavljaju matematički model koji koristi matrice za reprezentaciju aktivnosti u projektima i primjenjuju genetski algoritam za optimizaciju trajanja i troškova projekta. Autori uvode novi matematički pristup za optimizaciju linearnih projekata koristeći matrice, što omogućuje bolje raspoređivanje aktivnosti i pronalaženje optimalnih rasporeda.

Genetski algoritmi su se pokazali kao moćan alat u automatskom određivanju optimalnih arhitektonskih struktura u BIM sustavu. Tafrour i sur. [100] predlažu inovativan pristup temeljen na genetskom algoritmu za automatsko određivanje optimalne strukture za određenu arhitektonsku konfiguraciju u BIM sustavu. Metodologija se temelji na višekriterijskom optimizacijskom procesu koji generira početnu populaciju potencijalnih konfiguracija koje zadovoljavaju arhitektonska ograničenja i opća strukturna pravila. Rezultati pokazuju da je predloženi pristup vrlo učinkovit u generiranju optimalnih struktura koje zadovoljavaju definirane kriterije i zahtjeve strukturnog dizajna.

U području održavanja građevina, genetski algoritmi integrirani s diskretnom simulacijom događaja predstavljaju napredan model za optimizaciju planova održavanja. Nili i sur. [101] predstavljaju novi model koji integrira genetski algoritam i diskretnu simulaciju događaja radi identifikacije optimalnog plana održavanja mostova uzimajući u obzir ograničenja radne snage. Okvir se fokusira na minimiziranje troškova agencije i korisnika u projektu popravaka mostova, razmatrajući praktične ograničavajuće faktore poput ograničenja resursa i radnih ekipa. Ward i Savić [102] u svojoj studiji koristili su genetski algoritam za održavanje sustava odvodnje. Model je obuhvatio smanjenje troškova izgradnje, maksimiziranje poboljšanja strukturnog stanja i minimiziranje rizika od kvara, a njegova učinkovitost testirana je na kanalizacijskom sustavu u mjestima Devon, Cornwall, Dorset i Somerset u Ujedinjenom Kraljevstvu.

## 5. Zaključak

U ovom radu analizirana je primjena ekspertnih metoda u građevinskom sektoru za razdoblje od 2000. do 2024. godine, s posebnim naglaskom na održavanje objekata, inspekciju kanalizacijskih i vodoopskrbnih sustava, geotehniku, prometno inženjerstvo, predviđanje troškova projekta, trajanje projekta, smanjenje rizika na gradilištu te produktivnost radne snage. Ciljevi istraživanja ostvareni su kroz detaljnu analizu primjene ekspertnih metoda u građevinarstvu. Istraživanje je pokazalo da su ekspertni sustavi poput SCRAPs-a i EXPLORE-a ključni za optimizaciju procesa održavanja objekata i infrastrukture. Integracija tehnologija BIM-a, GIS-a i RFID-a omogućila je naprednu analizu podataka, što je rezultiralo smanjenjem troškova i povećanjem učinkovitosti. Neuronske mreže uspješno predviđaju režijske troškove na gradilištu i troškove materijala, smanjujući varijacije i poboljšavajući produktivnost radnih operacija. Fuzzy logika omogućuje precizniju analizu

rizika, upravljanje aktivnostima i bolju procjenu konačnih troškova. Primjena genetskih algoritama u planiranju projekata i integracija s BIM-om i diskretnom simulacijom događaja pokazala je značajno smanjenje troškova i optimizaciju planova održavanja. Tijekom istraživanja jedan od glavnih problema bio je ograničen broj dostupnih radova koji detaljno i jasno prezentiraju rezultate primjene ekspertnih metoda u građevinskom sektoru, konkretno poput fuzzy logike i neuronskih mreža. Iako su mnogi radovi opisivali primjenu ovih metoda na određenim slučajevima, često su nedostajale jasne informacije o konkretnim rezultatima i doprinosima tih istraživanja. Također, radovi koji su se bavili primjenom genetskih algoritama bili su nešto detaljniji, posebno u novijim publikacijama (2020. – 2024. godina). Međutim, i kod tih

radova, često su nedostajale konkretne informacije o tome kako su rezultati istraživanja doprinijeli boljem razumijevanju ili optimizaciji procesa. Pregledom objavljenih radova o primjeni ekspertnih metoda u građevinarstvu vidljivo je da se oni značajno primjenjuju u svim sektorima građevinarstva, no isto tako postoje još velike mogućnosti primjene tih metoda u građevinarstvu u budućnosti. Kako bi se dodatno unaprijedila primjena ekspertnih metoda u građevinskom sektoru, potrebno je nastaviti s razvojem i prilagodbom sustava specifičnim potrebama i uvjetima, osigurati adekvatnu obuku i edukaciju za inženjere građevinarstva koji će raditi s ovim sustavima te stalno poticati suradnju između akademskih institucija, industrijskih partnera i pravnih tijela kako bi se osiguralo usvajanje i primjena najnovijih praksi i standarda.

## LITERATURA

- [1] Jin, R., Zou, Y., Gidado, K., Ashton, P., Painting, N.: Scientometric analysis of BIM-based research in construction engineering and management, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 26 (2019) 8, pp. 1750-1776, <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2018-0350>.
- [2] Manzoor, B., Othman, I., Durdyev, S., Ismail, S., Wahab, M.: Influence of Artificial Intelligence in Civil Engineering toward Sustainable Development - A Systematic Literature Review, *Applied System Innovation*, 52 (2021) 4, pp. 1-17 <https://doi.org/10.3390/asi4030052>.
- [3] Giang, D.T.H., Sui Pheng, L.: Role of construction in economic development: Review of key concepts in the past 40 years, *Habitat International*, 35 (2011) 1, pp. 118-125, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2010.06.003>
- [4] Pan, Y., Zhang, L.: Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends, *Automation in Construction*, 122 (2021) 103517, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>.
- [5] Walek, B., Fojtik, V.: A hybrid recommender system for recommending relevant movies using an expert system, *Expert systems with applications*, 158 (2020) 113452, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113452>.
- [6] Badiru, A.B., Cheung, J.Y.: Fundamentals of expert systems (Chapter), *Fuzzy engineering expert systems with neural network applications*, New York, John Wiley & Sons, pp. 13-24, 2002.
- [7] Gupta, I., Nagpal, G.: AI and Expert Systems, *Artificial intelligence and expert systems* (Chapter), First edition, Virginia, Mercury learning and information, (2018), pp. 71-93.
- [8] Tan, H.: A brief history and technical review of the expert system research, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/242/1/012111>.
- [9] Guerrero, J.I., Personal, E., García, A., Parejo, A., Pérez, F., León, C.: A rule-based expert system for heterogeneous data source integration in smart grid systems, *Expert Systems: Design, Applications and Technology*, (2017), pp. 60-92.
- [10] Santos, J., Torres-Machi, C., Morillas, S., Cerezo, V.: A fuzzy logic expert system for selecting optimal and sustainable life cycle maintenance and rehabilitation strategies for road pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 23 (2022) 17, <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1751161>.
- [11] Abioye, S.O., Oyedele, L.O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J.M.D., Bilal, M., et al.: Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021) 103299, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>.
- [12] Edirisinghe, R., London, K.A., Kalutara, P., Aranda-Mena, G.: Building information modelling for facility management: are we there yet?, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24 (2017) pp. 14-47, <https://doi.org/10.1108/ECAM-06-2016-0139>.
- [13] Sabol, L.: BIM Technology for FM (Chapter), *BIM for Facility Managers*, John Wiley & Sons, (2013), pp. 17-45, <https://doi.org/10.1002/9781119572633.ch2>.
- [14] Kang, T.W., Choi, H.S.: BIM-based Data Mining Method considering Data Integration and Function Extension, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22 (2018) pp. 1-12, <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0561-6>.
- [15] Solihin, W., Eastman, C., Lee, Y.C., Yang, D.H.: A simplified relational database schema for transformation of BIM data into a query-efficient and spatially enabled database, *Automation In Construction*, 84 (2017), pp. 367-383, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.002>.
- [16] Ahmed, A., Ploennigs, J., Menzel, K., Cahill, B.: Multi-dimensional building performance data management for continuous commissioning, *Advanced Engineering Informatics*, 24 (2010) 4, pp. 466-475, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2010.06.007>.
- [17] Curry, E., O'Donnell, J., Corry, E., Hasan, S., Keane, M., O'Riain, S.: Linking building data in the cloud: Integrating cross-domain building data using linked data, *Advanced Engineering Informatics*, 27 (2013) 2 pp. 206-219, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.003>.
- [18] Shen, W., Hao, Q., Xue, Y.: A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance, *Automation in Construction*, 25 (2012), pp. 41-48, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.003>.
- [19] Kim, K., Kim, H., Kim, W., Kim, C., Kim, J., Yu, J.: Integration of ifc objects and facility management work information using Semantic Web, *Automation in Construction*, 87 (2018), pp. 173-187, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.019>.

- [20] Peng, Y., Lin, J.R., Zhang, J.P., Hu, Z.Z.: A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance, *Building and Environment*, 126 (2017), pp. 483-495, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.030>.
- [21] Kang, T.W., Hong, C.H.: A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration, *Automation in Construction*, 54 (2015), pp. 25-38, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.019>.
- [22] Mignard, C., Nicolle, C.: Merging BIM and GIS using ontologies application to urban facility management in ACTIVE3D, *Computers in Industry*, 65 (2014) 9, pp.1276-1290, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>.
- [23] Lin, Y.C., Su, Y.C., Chen, Y.P.: Developing Mobile BIM/2D Barcode-Based Automated Facility Management System, *The Scientific World Journal*, 2014 (2014) 374735, pp. 1-16, <https://doi.org/10.1155/2014/374735>.
- [24] Motamedi, A., Saini, R., Hammad, A., Zhu, B.: Role-based access to facilities lifecycle information on RFID tags, *Advanced Engineering Informatics*, 25 (2011) 3, pp. 559-568, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.03.004>.
- [25] Motamedi, A., Soltani, M.M., Setayeshgar, S., Hammad, A.: Extending IFC to incorporate information of RFID tags attached to building elements, *Advanced Engineering Informatics*, 30 (2016) 1, pp. 39-53, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.11.004>.
- [26] Khan, M.S., Kim, I.S., Seo, J.: A boundary and voxel-based 3D geological data management system leveraging BIM and GIS, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118 (2023), 103277, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103277>.
- [27] Chung, S., Cho, C.S., Song, J., Lee, K., Lee, S., Kwon, S.: Smart Facility Management System Based on Open BIM and Augmented Reality Technology, *Applied Sciences*, 21 (2021) 11, pp. 1-24, <https://doi.org/10.3390/app112110283>.
- [28] Korkmaz, Ö., Basaraner, M.: Ontology Based Integration of BIM and GIS for the Representation of Architectural, Structural and Functional Elements of Buildings, *The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-4/W11*, (2024), pp. 49-55, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W11-2024-49-2024>.
- [29] Mignard, C., Nicolle, C.: Merging BIM and GIS using ontologies application to urban facility management in ACTIVE3D, *Computers in Industry*, 65 (2014) 9, pp.1276-1290, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.07.008>.
- [30] Mignard, C., Nicolle, C.: SIGA3D: Semantic Combination of IFC and GIS to Support Urban Facilities Management (Chapter), *Handbook of Research on E-Business Standards and Protocols*, IGI Global, pp. 806-828, 2012, <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0146-8.ch037>.
- [31] Kang, T.W., Hong, C.H.: A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration, *Automation in Construction*, 54 (2015) pp. 25-38, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.019>.
- [32] Cetl, V., Markovinović, D., Šamanović, S., Rezo, M.: Integracija BIM-a i GIS-a, 15. simpozij ovlaštenih inženjera geodezije - Geodezija i vode, Zagreb, pp. 117-124., 2022.
- [33] Gao, X., Pishdad-Bozorgi, P.: BIM-enabled facilities operation and maintenance: A review, *Advanced Engineering Informatics*, 39 (2019), pp. 227-247, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.01.005>.
- [34] Kameli, M., Hosseinalipour, M., Majrouhi Sardroud, J., Ahmed, S.M., Behravan, M.: Improving maintenance performance by developing an IFC BIM/RFID-based computer system, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12 (2021) 6, pp. 3055-3074, <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02464-3>.
- [35] Motamedi, A., Saini, R., Hammad, A., Zhu, B.: Role-based access to facilities lifecycle information on RFID tags, *Advanced Engineering Informatics*, 25 (2011) 3, pp. 559-568, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2011.03.004>.
- [36] Motamedi, A., Soltani, M.M., Setayeshgar, S., Hammad, A.: Extending IFC to incorporate information of RFID tags attached to building elements, *Advanced Engineering Informatics*, 30 (2016) 1, pp. 39-53, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.11.004>.
- [37] Lin, Y.C., Su, Y.C., Chen, Y.P.: Developing Mobile BIM/2D Barcode-Based Automated Facility Management System, *The Scientific World Journal*, (2014), pp. 1-16, <https://doi.org/10.1155/2014/374735>.
- [38] Hahn, M., Palmer, R.N., Merrill, M.S.: Prioritizing Sewer Line Inspection with an Expert System, *American Society of Civil Engineers*, (2000), pp. 1-9, [https://doi.org/10.1061/40430\(1999\)86](https://doi.org/10.1061/40430(1999)86).
- [39] Hahn, M.A., Palmer, R.N., Merrill, M.S., Lukas, A.B.: Expert System for Prioritizing the Inspection of Sewers: Knowledge Base Formulation and Evaluation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (2002), pp. 121-129, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2002\)128:2\(121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2002)128:2(121)).
- [40] Giovanelli, M., Maglionico, M.: Identification of the optimal level of service for sewer networks by means of expert procedure, 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- [41] Ana Jr. E., Bauwens, W.: Sewer Network Asset Management Decision Support Tools: A Review, *International Symposium on New Directions in Urban Water Management*, Belgium, 2007.
- [42] Tagherouit, W. B., Bennis, S., Bengassem, J.: A Fuzzy Expert System for Prioritizing Rehabilitation of Sewer Networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26 (2011), pp. 146-152, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00673.x>.
- [43] Al-Zahrani, M.A., Moeid, K.: Locating Optimum Water Quality Monitoring Stations in Water Distribution System, Bridging the Gap, *Reston, American Society of Civil Engineers*, (2001), pp. 1-9, [https://doi.org/10.1061/40569\(2001\)393](https://doi.org/10.1061/40569(2001)393).
- [44] León, C., Martín, S., Elena, J.M., Luque, J.: EXPLORE - Hybrid Expert System for Water Networks Management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (2000), pp. 65-74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:2(65)).
- [45] Moglia, M., Burn, S., Meddings, S.: Decision support system for water pipeline renewal prioritisation, *Journal of Information Technology in Construction*, 11 (2006), pp. 237-256.
- [46] Fares, H., Zayed, T.: Hierarchical Fuzzy Expert System for Risk of Failure of Water Mains. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1 (2010) 1, pp. 53-62, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000037).
- [47] Sandeep, K., Rakesh, K.: CLIPS based decision support system for water distribution networks. *Drinking Water Engineering and Science*, 4 (2011) 1, pp. 37-50, <https://doi.org/10.5194/dwes-4-37-2011>.
- [48] Karasneh, S., Moqbel, S.: Priority-based decision model for rehabilitation of water networks using fahp, *Water Conservation & Management*, 8 (2024) 1, pp. 37-46.



- [49] Petley, D.N., Mantovani, F., Bulmer, M.H., Zannoni, A.: The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns, *Geomorphology*, 66 (2006) 1-4 pp. 133-147, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.09.011>.
- [50] Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A.C., Peruccacci, S.: Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts, *Geomorphology*, 114 (2010) 3 pp. 129-42, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.020>.
- [51] Thiebes, B., Bell, R., Glade, T., Jäger, S., Anderson, M., Holcombe, L.: A WebGIS decision-support system for slope stability based on limit-equilibrium modelling, *Engineering Geology*, 158 (2013), pp.109-118, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.004>.
- [52] Muthu, K., Petrou, M.: Landslide-Hazard Mapping Using an Expert System and a GIS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (2007) 2, pp. 522-531, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.885404>.
- [53] Wan, S., Lei, T.-C., Chou T.-Y.: A landslide expert system: image classification through integration of data mining approaches for multi-category analysis, *International Journal of Geographical Information Science*, 26 (2012) 4, pp. 747-770, <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.613397>.
- [54] Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Nikolakopoulos, K., Angelitsa, V., Ilija, I.: Developing a landslide susceptibility map based on remote sensing, fuzzy logic and expert knowledge of the Island of Lefkada, Greece, *Environmental Earth Sciences*, 77 (2018) 363, pp. 1-23, <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7548-6>.
- [55] Adhikari, I., Baral, A., Zahed, E., Abediniangerabi, B., Shahandashti, M.: Early stage multi-criteria decision support system for recommending slope repair methods, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 38 (2021) 2, pp. 127-144, <https://doi.org/10.1080/10286608.2021.1923699>.
- [56] Albusoda, B.S., Al-Hamdani, D.A., Abbas, M.F.: Dry Density Based on Soil Index Properties by Using Expert System, *Key Engineering Materials*, 857 (2020), pp. 266-272, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.266>.
- [57] Mosa, A.M., Taha, M.R., Ismail, A., Rahmat, R.A.O.K.: A diagnostic expert system to overcome construction problems in rigid highway pavement, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19 (2013) 6, pp.846-861, <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801905>.
- [58] Milad, A., Majeed, S.A., Adwan, I., Nasradeen, A.K., Yusoff, N.I.M.: Adaptive neuro fuzzy inference system for predicting flexible pavement distress in tropical regions, *Journal of Engineering Science and Technology*, 17 (2022) 1, pp. 1-11.
- [59] Al-Mansour, A., Lee, K.W.W., Al-Qaili, A.H.: Prediction of Pavement Maintenance Performance Using an Expert System, *Applied Sciences*, 12 (2022) 10, pp. 1-14, <https://doi.org/10.3390/app12104802>.
- [60] Pereira, H.M., Júnior, J.E.B., Nóbrega, R.A.A.: Geospatial-based decision support system for prioritizing road segments for maintenance and rehabilitation, *World Conference on Transport Research Society*, 16 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2024.101170>.
- [61] Jadid, N., Badrah, M.: Decision support system approach for construction materials selection, *Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, pp. 1-7, 2012.
- [62] Yang, J., Ogunkah, I.C.B.: A Multi-Criteria Decision Support System for the Selection of Low-Cost Green Building Materials and Components, *Journal of Building Construction and Planning Research*, 1 (2013) 4, pp. 89-130, <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2013.14013>.
- [63] Akadiri, P.O., Olomolaiye, P.O., Chinyio, E.A.: Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects, *Automation in Construction*, 30 (2013), pp. 113-125, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>.
- [64] Goodarziad, P., Mohammadi, G.E., Arashpour, M.: Predicting the construction labour productivity using artificial neural network and grasshopper optimisation algorithm, *International Journal of Construction Management*, 23 (2023), pp. 763-779, <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1927363>.
- [65] Abdolrasol, M.G.M., Hussain, S.M.S., Ustun, T.S., Sarker, M.R., Hannan, M.A., Mohamed, R., et al.: Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review, *Electronics (BASEL)*, 10 (2021) 21, pp. 1-43, <https://doi.org/10.3390/electronics10212689>.
- [66] Zou, J., Han, Y., So, S.S.: Overview of Artificial Neural Networks (Chapter), *Artificial Neural Networks: Methods and Protocols*, Springer, (2008), pp. 14-22, [https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-60327-101-1_2).
- [67] Wilamowski, B.: Neural network architectures and learning algorithms, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3 (2009), pp. 56-63, <https://doi.org/10.1109/MIE.2009.934790>.
- [68] Leśniak, A., Juszczyk, M.: Prediction of site overhead costs with the use of artificial neural network based model, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (2018) 3, pp. 973-982, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.014>.
- [69] Attalla, M., Hegazy, T.: Predicting Cost Deviation in Reconstruction Projects: Artificial Neural Networks versus Regression, *Journal OF Construction Engineering and Management*, 129 (2003) 4, pp. 405-411, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:4\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:4(405)).
- [70] ElSawy, I., Razeq, M.A.M., Hosny, H.: A Neural Network Model for Construction Projects Site Overhead Cost Estimating in Egypt, *International Journal of Computer Science*, 8 (2011) 3, pp. 273-283.
- [71] Moselhi, O., El-Sawah, H.: Comparative study in the use of neural networks for order of magnitude cost estimating in construction, *Journal of Information Technology in Construction*, 19 (2014), pp. 462-473.
- [72] Yadav, R., Vyas, M., Vyas, V., Agrawal, S.: Development of cost estimating method for bricklayer cost, *International Journal of Engineering Research and Technology*, (2016), pp. 430-441.
- [73] Pessoa, A., Sousa, G., Maués, L., Alvarenga, F., Santos, D.: Cost Forecasting of Public Construction Projects Using Multilayer Perceptron Artificial Neural Networks: A Case Study, *Ingeniería e Investigación*, 41 (2021) 3, pp. 1-11. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n3.87737>.
- [74] Maghrebi, M., Sammut, C., Waller, T.S.: Predicting the Duration of Concrete Operations Via Artificial Neural Network and by Focusing on Supply Chain Parameters, *Building Research Journal*, 61 (2014), pp. 1-14. <https://doi.org/10.2478/brj-2014-0001>.
- [75] Golizadeh, H., Sadeghifam, A.N., Aadal, H., Majid, M.Z.A.: Automated tool for predicting duration of construction activities in tropical countries, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20 (2016), pp. 12-22, <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0263-x>.
- [76] Aswed, G.K.: Productivity estimating model for bricklayers in construction projects using artificial neural networks, *Journal of Engineering Sciences*, 9 (2016), pp.183-199.
- [77] Al-Zwainy, F.M.S., Rasheed, H.A., Ibraheem, H.F.: Development of the construction productivity estimation model using artificial neural network for finishing works for floors with marble, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (2012), pp. 714-722.



- [78] Cheung, S.O., Wong, P.S.P., Fung, A.S.Y., Coffey, W.V.: Predicting project performance through neural networks, *International Journal of Project Management*, 24 (2006), pp. 207-215, <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.08.001>.
- [79] Alarcón, L.F., Mourgues, C.: Performance Modeling for Contractor Selection, *Journal of Management in Engineering*, 18 (2002), pp. 52-60, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2002\)18:2\(52\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2002)18:2(52)).
- [80] Zadeh, L.A.: *Fuzzy Logic (Chapter)*, Encyclopedia of Complexity and Systems Science Series, Springer, New York, 2009, [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2628-3\\_234](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2628-3_234).
- [81] Hentout, A., Maoudj, A., Aouache, M.: A review of the literature on fuzzy-logic approaches for collision-free path planning of manipulator robots, *Artificial Intelligence Review*, 56 (2023), pp. 3369-3444, <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10257-7>.
- [82] Cho, H.N., Choi, H.H., Kim, Y.B.: A risk assessment methodology for incorporating uncertainties using fuzzy concepts, *Reliability Engineering and System Safety*, 78 (2002), pp. 173-183, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00158-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00158-8).
- [83] Amiri, M., Ardeshir, A., Zarandi, M.H.F.: Fuzzy probabilistic expert system for occupational hazard assessment in construction, *Safety Science*, 93 (2017), pp. 16-28, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.11.008>.
- [84] Debnath, J., Biswas, A., Sivan, P., Sen, K.N., Sahu, S.: Fuzzy inference model for assessing occupational risks in construction sites, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 55 (2016), pp. 114-128, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.08.004>.
- [85] Liu, H.T., Tsai, Y.: A fuzzy risk assessment approach for occupational hazards in the construction industry, *Safety Science*, 50 (2012), pp. 1067-1078, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.11.021>.
- [86] Janackovic, G.Lj., Savic, S.M., Stankovic, M.S.: Selection and ranking of occupational safety indicators based on fuzzy AHP: A case study in road construction companies, *The South African Journal of Industrial Engineering*, 24 (2013) 3, pp. 1-24, <https://doi.org/10.7166/24-3-463>.
- [87] Seker, S., Zavadskas, E.: Application of Fuzzy DEMATEL Method for Analyzing Occupational Risks on Construction Sites, *Sustainability*, 9 (2017), pp. 1-19, <https://doi.org/10.3390/su9112083>.
- [88] Oliveros, A.V.O., Fayek, A.R.: Fuzzy Logic Approach for Activity Delay Analysis and Schedule Updating, *Journal of Construction Engineering and Management*, 131 (2005) pp. 42-51, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:1\(42\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:1(42)).
- [89] Gunduz, M., Nielsen, Y., Ozdemir, M.: Fuzzy Assessment Model to Estimate the Probability of Delay in Turkish Construction Projects, *Journal of Management in Engineering*, 31 (2015), pp. 1-49, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000261).
- [90] Gómez-Cabrera, A., Gutierrez-Bucheli, L., Muñoz, S.: Causes of time and cost overruns in construction projects: a scoping review, *International Journal of Construction Management*, 24 (2024), pp. 1107-1125, <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2252288>.
- [91] Knight, K., Robinson, F.A.: Use of Fuzzy Logic for Predicting Design Cost Overruns on Building Projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 128 (2002), pp. 503-512, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(503\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(503)).
- [92] Gen, M., Lin, L.: *Genetic Algorithms and Their Applications (Chapter)*, Handbook of Engineering Statistics, Springer, London, (2023), pp. 635-674, [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7503-2\\_33](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7503-2_33).
- [93] Katoch, S., Chauhan, S.S., Kumar, V.: A review on genetic algorithm: past, present, and future, *Multimedia Tools and Applications*, 80 (2021), pp. 8091-8126, <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.
- [94] Chambers, L.D.: Decoupled Optimization of Power Electronics Circuits Using Genetic Algorithms (Chapter), *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*, Chapman and Hall/CRC, New York, 2000, <https://doi.org/10.1201/9781420035568>.
- [95] Boukhater, C.M., Dakroub, O., Lahoud, F., Awad, M., Artail, H.: An intelligent and fair GA carpooling scheduler as a social solution for greener transportation, 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, (2014), pp. 182-186, <https://doi.org/10.1109/MELCON.2014.6820528>.
- [96] Kumar, V., Pandey, A., Singh, R.: Project success and critical success factors of construction projects: project practitioners' perspectives, *Organization, Technology and Management in Construction, an International Journal*, 15 (2023), pp. 1-22, <https://doi.org/10.2478/otmcj-2023-0001>.
- [97] Albayrak, G.: Novel Hybrid Method in Time-Cost Trade-Off for Resource-Constrained Construction Projects, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44 (2020) 2020, pp. 1295-1307, <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00437-2>.
- [98] Zhang, Y., Li, X., Teng, Y., Bai, S., Chen, Z.: Two-list genetic algorithm for optimizing work package schemes to minimize project costs, *Automation in Construction*, 165 (2024), pp. 1-18, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105595>.
- [99] Altanany, M.Y., Badawy, M., Ebrahim, G.A., Ehab, A.: Modeling and optimizing linear projects using LSM and Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), *Automation in Construction*, 165 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105567>.
- [100] Tafraout, S., Bourahla, N., Bourahla, Y., Mebarki, A.: Automatic structural design of RC wall-slab buildings using a genetic algorithm with application in BIM environment, *Automation in Construction*, 106 (2019), pp. 1-10, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102901>.
- [101] Nili, M.H., Taghaddos, H., Zahraie, B.: Integrating discrete event simulation and genetic algorithm optimization for bridge maintenance planning, *Automation in Construction*, 122 (2021) 1, pp. 1-20, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103513>.
- [102] Ward, B., Savić, D.A.: A multi-objective optimisation model for sewer rehabilitation considering critical risk of failure, *Water Science and Technology*, 66 (2012), pp. 2410-2417, <https://doi.org/10.2166/wst.2012.393>.