

Primjena analitičkog mrežnog procesa za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla

Cerić, Anita; Marčić, Danijela; Kovačević, Meho Saša

Source / Izvornik: **Građevinar, 2013, 65, 919 - 929**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

<https://doi.org/10.14256/JCE.841.2013>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:138214>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Primljen / Received: 18.2.2013.

Ispravljen / Corrected: 16.8.2013.

Prihvaćen / Accepted: 15.10.2013.

Dostupno online / Available online: 10.11.2013.

Primjena analitičkog mrežnog procesa za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla

Autori:

Prof.dr.sc. **Anita Cerić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za organizaciju i ekonomiku građenja

anita@grad.hr

Doc.dr.sc. **Danijela Marčić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za geotehniku

djkk@grad.hr

Prof.dr.sc. **Meho Saša Kovačević**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Zavod za geotehniku

msk@grad.hr

Pregledni rad

Anita Cerić, Danijela Marčić, Meho Saša Kovačević

Primjena analitičkog mrežnog procesa za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla

Temeljenje teških građevina u mekom tlu može se riješiti poboljšanjem tla. Održivo poboljšanje tla postiže se miješanjem tla sa sintetiziranim vezivima - geopolimerima. Prirodno tlo se na taj način pretvara u novi materijal. U radu je prikazana primjena analitičkog mrežnog procesa (ANP) za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla. Analize osjetljivosti pokazale su izrazitu stabilnost rezultata odlučivanja.

Ključne riječi:

analitički hijerarhijski proces (AHP), analitički mrežni proces (ANP), održivo poboljšanje tla, procjena rizika, geopolimeri

Subject review

Anita Cerić, Danijela Marčić, Meho Saša Kovačević

Applying the analytic network process for risk assessment in sustainable ground improvement

Constructing foundations for heavy buildings on soft ground can be carried out by ground improvement. Sustainable ground improvement is achieved by adding synthesised binding materials - geopolymers. Natural ground composition in this way is transformed into new material. This paper presents the implementation of the Analytical Network Process (ANP) for assessing risk in sustainable ground improvement. Sensitivity analyses have shown exceptionally stable decision making results.

Key words:

Analytic Hierarchy Process (AHP), Analytic Network Process (ANP), Sustainable ground improvement, Risk assessment, Geopolymers

Übersichtsarbeit

Anita Cerić, Danijela Marčić, Meho Saša Kovačević

Anwendung des analytischen Netzwerkprozesses für Risikobewertung in nachhaltiger Bodenverbesserung

Die Konstruktion von Fundamenten für schwere Bauten auf weichem Grund wird oft durch eine Verbesserung des Bodens ausgeführt. Nachhaltige Bodenverbesserung kann durch die Anwendung von synthetisierten Bindemitteln (Geopolymeren) erzielt werden. Der natürliche Aufbau des Bodens wird dadurch in ein neues Material transformiert. Diese Arbeit beschreibt die Implementation des analytischen Netzwerkprozesses (ANP) für die Risikobewertung in der nachhaltigen Bodenverbesserung. Sensibilitätsanalysen haben ausgesprochen stabile Resultate im Entscheidungsprozess gezeigt.

Schlüsselwörter:

analytischer Hierarchieprozess (AHP), analytischer Netzwerkprozess (ANP), nachhaltige Bodenverbesserung, Risikobewertung, Geopolymere

1. Uvod

Poboljšanje tla predstavlja tehnološki postupak kojim se povećava krutost i nosivost tla. Tim postupkom smanjuju se ukupna i diferencijalna slijeganja, smanjuje se vrijeme potrebno da se ostvare deformacije te smanjuje propusnost tla. Moguće je povećati erozijsku stabilnost tla te smanjiti opasnost od pojave likvefakcije. S obzirom na povećane potrebe za temeljenjem teških infrastrukturnih građevina u ekstremno teškim uvjetima, naglo se razvijaju i tehnologije, odnosno tehnike poboljšanja tla [1]. Pomoću mehaničkih strojeva za miješanje tla vezivno sredstvo se umiješava u tlo i dobivaju se elementi u tlu raznih oblika i konfiguracija [2]. U tlo se ugrađuju prirodni ili umjetni materijali koji u manjoj ili većoj mjeri mogu onečistiti okoliš i primjerice nepovoljno utjecati na podzemna izvorišta vode [3].

Za proizvodnju standardnih vezivnih materijala, cementa i vapna, troše se velike količine prirodne sirovine i fosilnih goriva. Zbog kemizma, tj. dekarbonatizacije C_aCO_3 oslobađa se velika količina CO_2 u atmosferu. Kemizam i svojstva vezivnih materijala tijekom hidratacije omogućuju stvaranje sintetičnih veziva takozvanih geopolimera [4]. Uvođenjem sintetičnih veziva može se smanjiti udjel cementa i vapna u postupku poboljšanja tla upotrebom otpadnih materijala iz drugih industrijskih procesa kao što su zgura i leteći pepeo [5, 6]. Maseni udjel cementa i vapna u postupku poboljšanja tla iznosi 2-5%. Svako smanjenje potrošnje cementa i vapna pridonijet će smanjenju potrošnje prirodne sirovine i fosilnih goriva, a time i smanjenju emisije CO_2 . Primjerice, za poboljšanje jedne tone mase tla potrebna je minimalna količina cementa od 20 kg te potrošnja 30 kg prirodne sirovine i 96 MJ fosilnih goriva. Pri tome se u atmosferu emitira 18 kg CO_2 [7].

Odabirom odgovarajućeg veziva, stupnja poboljšanja tla, odgovarajuće tehnologije održivog poboljšanja tla te metode kontrole uspješnosti poboljšanja moguće je kvantificirati uspješnost izvedenih zahvata i upravljati rizikom [8]. Upravljanje rizicima u održivom poboljšanju tla prikazano je u radovima [9-13].

2. Rizici u projektima održivog poboljšanja tla

U svakom projektu održivog poboljšanja tla moguće je identificirati velik broj potencijalnih rizika, tj. događaja čiji nepovoljni ishod može negativno utjecati na uspješnost provedbe projekta. Praktički svaka aktivnost koja se provodi na realizaciji projekta opterećena je mogućnošću da nešto krene u neželjenom smjeru. Bilo bi veoma teško napraviti općenitu listu svih rizika koji se pojavljuju u takvim projektima bez obzira na veličinu, tip, sadržaj, tj. specifičnosti pojedinog projekta. Cilj identifikacije je formiranje liste ključnih rizika za svaki projekt održivog poboljšanja tla. Rizici i njihovi učinci trebali bi se razmatrati na svim ključnim mjestima odlučivanja o projektu i uz sudjelovanje svih onih koji su uključeni u proces donošenja odluka.

Za svaki identificirani rizik, tijekom trajanja projekta, provodi se procjena rizika i, ovisno o prihvatljivosti rizika, priprema se adekvatan odgovor na rizik [14]. Akcija poduzeta kao odgovor na rizik može proizvesti nove rizike koje treba identificirati, analizirati i ovisno o prihvatljivosti rizika odgovoriti na njih. Tako proces upravljanja rizicima postaje ponavljajući proces [15].

Procjenu rizika u građevinskim projektima prikazali su autori u radovima [16-20]. Procjena rizika provodi se određivanjem izloženosti riziku. Izloženost riziku predstavlja umnožak vjerojatnosti rizika i utjecaja rizika na projekt [21]. Vjerojatnost rizika je bezdimenzijska veličina. Rizik može imati utjecaj na vrijeme, troškove, kvalitetu i okoliš, no na kraju se bilo koji utjecaj rizika može izraziti u novčanim jedinicama [22]. To znači da izloženost riziku ima dimenziju novčane jedinice u kojoj se računa. Na taj način izloženost riziku za pojedini rizik može poprimiti bilo koju vrijednost i računa se neovisno o svim drugim rizicima u projektu. Apsolutna vrijednost izloženosti riziku, promatrana za sebe, nema gotovo nikakvu uporabnu vrijednost. Zbog toga je važno odrediti koliko je izloženost pojedinom riziku manja ili veća od izloženosti ostalim rizicima. Određivanjem izloženosti za sve identificirane rizike i njihovim stavljanjem u međusobni odnos može se sastaviti lista prioriteta rizika [23].

Ovisno o položaju rizika u listi prioriteta, odnosno relativnoj vrijednosti njegove izloženosti u odnosu na ostale rizike, bit će angažirana odgovarajuća sredstva za predviđeni odgovor na rizik. Za svaki rizik donosi se ocjena o njegovoj prihvatljivosti, odnosno definiraju se postupci za upravljanje tim rizikom. Veza između prihvatljivosti rizika i izloženosti riziku rezultat je politike tima koji upravlja rizicima. Ona ovisi o tipu, karakteru i složenosti projekta, kao i o iskustvima stečenim izvedbom sličnih projekata [24].

Procjena rizika utjecaja na okoliš u građevinskim projektima predmet je istraživanja brojnih autora [25-29]. Lista prioriteta kao rezultat procjene rizika može se odrediti kvantitativnim i, kvalitativnim pristupom, odnosno njihovom kombinacijom. Kvantitativni pristup formiranju liste prioriteta podrazumijeva da se vjerojatnost rizika i utjecaj rizika mogu nekom od poznatih kvantitativnih metoda analize rizika eksplicitno izračunati. Za to je potrebno raspolagati odgovarajućom bazom podataka koja bi poslužila za formiranje razdiobe vjerojatnosti, odnosno omogućila izravno izračunavanje utjecaja na vrijeme, troškove, kvalitetu i okoliš. Kvalitativni pristup formiranju liste prioriteta primjenjuje se kad nije dostupna odgovarajuća baza podataka o prethodno izvedenim projektima na osnovi koje bi se uspostavila funkcija razdiobe vjerojatnosti i odredila vjerojatnost rizika. Također, kad je riječ o kvalitativnom pristupu, nisu dostupni ni svi potrebni pokazatelji za izravno izračunavanje posljedica, odnosno utjecaja koje bi rizični događaj izazvao na vrijeme, troškove, kvalitetu i okoliš. Najčešći slučaj u stvarnom životu je kombinacija kvantitativnog i kvalitativnog pristupa. Za neke će rizike postojati odgovarajući fond podataka na osnovi kojeg

će se moći ocijeniti njegova vjerojatnost, odnosno utjecaj. Za neke to neće biti moguće. Ako se za sve rizike može izračunati vjerojatnost, treba primijeniti postupak normaliziranja, odnosno kvantitativni pristup. Ako se za neki identificirani rizik ne može izračunati vjerojatnost, treba najprije normalizirati one rizike za koje je proračun moguć, a za odnos vjerojatnosti tih rizika i onog za koji nije moguće izračunati vjerojatnost treba primijeniti kvalitativni pristup. Isti postupak treba primijeniti za utjecaj rizika na vrijeme, troškove, kvalitetu i okoliš.

3. Analitički mrežni proces (ANP)

Za provjeru rizika u održivom poboljšanju tla primijenjen je u ovom radu Analitički mrežni proces (eng. *Analytic network process* - ANP), koji pripada u skupinu metoda za višekriterijsko odlučivanje. ANP je uopćavanje analitičkog hijerarhijskog procesa (eng. *Analytic Hierarchy Process* - AHP) na način da se donositeljima odluka omogućiti složeni problem svesti na nelinearni mrežni oblik koji u sebi sadrži i linearni hijerarhijski oblik [30-34]. Primjena ANP-a u modeliraju okoliša i građevinskim projektima prikazana je u [35-39].

Hijerarhijska struktura sadržana u AHP-u svodi višedimenzionalni problem na najmanje tri razine: cilj, kriterije i alternative. Kriteriji mogu imati potkriterije. To je linearna "top-to-down" struktura kod koje su svi elementi pojedine razine neovisni jedni o drugima, a elementi više razine utječu na važnost elemenata niže razine. Proces započinje determiniranjem relativne važnosti pojedinih alternativa u odnosu na kriterije, odnosno potkriterije. Zatim se uspoređuje utjecaj kriterija s obzirom na cilj. Konačno se rezultati tih dviju analiza sintetiziraju da se izračuna relativna važnost alternativa u odnosu na postizanje cilja.

Mrežna struktura sadržana u ANP-u svodi višedimenzionalni problem na klasterne i elemente odnosno čvorove unutar klastera. To je nelinearna "povratna" struktura kod koje je omogućeno modeliranje interakcije, odnosno ovisnosti između elemenata jednog klastera (unutarnja ovisnost) kao i modeliranje ovisnosti između elemenata različitih klastera (vanjska ovisnost). Hijerarhija je specijalni slučaj mreže kod koje postoji ovisnost samo između elemenata različitih klastera i kod koje ta ovisnost ide samo u jednom smjeru, i to od elemenata više razine prema elementima niže razine.

ANP predstavlja nadogradnju AHP-a jer omogućava usporedbu utjecaja kriterija u odnosu na alternative kao i međusobnu usporedbu alternativa u odnosu na svaku od njih s obzirom na kontrolni kriterij koji može predstavljati cilj u hijerarhijskoj strukturi. Međusobna ovisnost mrežnih elemenata omogućava bolje modeliranje kompleksnih problema jer je većina problema iz stvarnog života nelinearna, a povratne veze omogućuju preciznije određivanje prioriteta elemenata i pouzdanije donošenje odluka. Modeliranjem interakcije između kriterija i alternativa u modelu postiže se veća stabilnost rezultata analize. To čini ANP posebno pogodnim za procjenu rizika.

U analizirizika može se vanjska ovisnost, kod koje je modeliranje ovisnosti između elemenata različitih klastera, prikazati na primjeru određivanja utjecaja rizika za identificirane rizike rizik1 i rizik2. Kriteriji za određivanje utjecaja su produljenje trajanja realizacije projekta (*vrijeme*) i nepovoljan utjecaj rizika na okoliš (*okoliš*). Ako se pretpostavi da rizik1 izaziva mali utjecaj na *okoliš* ali više produljuje trajanje projekta odnosno *vrijeme*, rizik2 izaziva manje produljenje trajanja projekta odnosno *vrijeme* ali ima znatno veći utjecaj na *okoliš* od rizika1. Pretpostavimo li da se radi o projektu značajnom za širu društvenu zajednicu, kriterij *okoliš* ima veći prioritet od kriterija *vrijeme*. U hijerarhijskoj strukturi (AHP) rizik1 dobiva veći prioritet jer izaziva manji utjecaj na *okoliš*. U povratnoj mrežnoj strukturi (ANP) moguće je usporediti utjecaje kriterija u odnosu na alternative. Ako se uspoređi kriterij u odnosu na rizik1, može se procijeniti da kriterij *okoliš* ima znatno jaču dominaciju u odnosu na kriterij *vrijeme* nego što je ima kriterij *vrijeme* u odnosu na kriterij *okoliš* za rizik1. Rezultat je da rizik2 može dobiti veći prioritet u odnosu na rizik1. To je u skladu s prioritetima koji bi bili postavljeni u stvarnom životu jer zdrav razum kaže da će u slučaju odgovora na dva rizika čiji je utjecaj na *okoliš* zadovoljavajući, veći prioritet imati onaj koji zahtijeva značajno veće produljenje trajanja projekta odnosno *vrijeme*.

Za ilustraciju unutarnje ovisnosti, kod koje je omogućeno modeliranje interakcije između elemenata jednog klastera, potrebno je imati bar tri mogućnosti odnosno identificirana tri rizika: rizik1, rizik2 i rizik3. Polazi se od zdravorazumske činjenice da rizici nisu međusobno neovisni u odnosu na utjecaj rizika. Donosi se prosudba koliko rizik2 ima veći utjecaj od rizika3 u odnosu na rizik1. Na primjer, u poboljšanju tla donosi se prosudba koliko je veći utjecaj rizika neodgovarajućeg odabira tehnologije poboljšanja tla od rizika nezadovoljavajuće izvedbe radova u odnosu na rizik neadekvatne provedbe istražnih radova. Jasno je da neadekvatna provedba istražnih radova ima znatno veći utjecaj na odabir tehnologije poboljšanja tla nego na izvedbu radova.

Primjeri o primjeni ANP-a za procjenu rizika u građevinskim projektima prikazani su u [40-45].

4. Primjena metode ANP za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla

Za prikaz primjene ANP-a odabran je primjer buduće izgradnje trgovačkog centra na istočnoj periferiji grada Zagreba. Veličina parcele predviđene za izgradnju iznosi oko 80.000 m², a tlocrtna je površina objekta oko 25.000 m². Temeljenje objekta predviđeno je na temeljnim stopama i pločama različitih dimenzija. Zahtijeva se da ukupna slijeganja budu u granicama 3-3,5 cm, a diferencijalna slijeganja 0,5-1,0 cm. Geotehničkim istražnim radovima ustanovljeni su, u prvih 14 m, slojevi jako stišljivih glina i organskog tla, a ispod toga slojevi dobro zbijenog pijeska i šljunka. Temeljno tlo je male krutosti i nosivosti pa treba, radi smanjenja ukupnih i

diferencijalnih slijeganja i povećanja nosivosti, nužno provesti poboljšanje tla. Objekt se predviđa izgraditi neposredno uz obalu rijeke Save pa poboljšanje tla predstavlja velik ekološki problem ako bi došlo do onečišćenja primjenom neke od tehnologija poboljšanja tla. Identificirani ključni rizici tijekom održivog poboljšanja tla koji predstavljaju mogućnosti u ANP modelu jesu:

- neadekvatni istražni radovi
- odabir neodgovarajuće tehnologije poboljšanja tla
- nedovoljno detaljno razrađen projekt poboljšanja tla
- nezadovoljavajuća izvedba radova na poboljšanju tla
- nezadovoljavajući monitoring, odnosno kontrola kvalitete postignutog poboljšanja tla.

Geotehnički istražni radovi služe kao podloga za odabir načina temeljenja i projektiranje temeljne konstrukcije. U krajnjem slučaju može se dogoditi da se geotehničkim istražnim radovima ustanovi kako je bolje odustati od projekta nego pod svaku cijenu pokušati temeljiti građevinu. Međutim, umjesto da se odustane od projekta može se prijeći na tlo prihvatljive krutosti i nosivosti, odnosno zamijeniti postojeće tlo novim, krućim i stabilnijim tlom na kojem će se temeljiti buduća građevina. Zamjena tla tehnički i ekonomski je moguća do relativno malih dubina. U okolnostima kada se loše tlo prostire do većih dubina, nužno je projektirati temeljnu konstrukciju, tako da se uzme u obzir mala krutost i nosivost tla ili treba poboljšati tlo.

Danas postoje brojne tehnologije za poboljšanje tla kao što su: dubinsko vibracijsko zbijanje, dubinsko miješanje, mlazno injektiranje, šljunčani piloti i sl. Odabir tehnologije za poboljšanje tla ovisi o kvaliteti i vrsti provedenih istražnih radova. Najčešći je slučaj da treba nakon odabira tehnologije poboljšanja tla, a za potebe projektiranja, nužno izvesti dodatne istražne radove. Odabir tehnologije poboljšanja tla usmjerava metodologiju projektiranja, izvedbu i kontrolu kvalitete poboljšanja tla.

Razrada projekta temeljenja ovisi o odabiru tehnologije poboljšanja tla. Za mnoge tehnologije poboljšanja koje se primjenjuju u današnjoj građevinskoj praksi ne postoje normirane procedure za projektiranje koje bi pouzdano odredile stupanj povećanja fizikalno-mehaničkih karakteristika tla nakon poboljšanja. Zato se prilikom projektiranja predviđa izvedba pokusnog polja gdje će se ispitati dobiveni učinci poboljšanja i na osnovi njih verificirati projektno rješenje. Alternativa je primijeniti tehnologiju poboljšanja tla, a samim tim i uvesti nove dodatne istražne radove.

Izvedba radova predstavlja kritičnu fazu realizacije svakog građevinskog projekta. Na uspješnost poboljšanja tla prije izvedbe radova utječu geotehnički istražni radovi, odabir tehnologije poboljšanja tla i razrada projekta, a nakon izvedbe radova i kontrola kvalitete izvedenih radova.

Velika pozornost nakon izvođenja radova na poboljšanju tla pridaje se kontroli kvalitete postignutog poboljšanja. Složeno stanje naprezanja i interakcija ugrađenih materijala i okolnog

tla onemogućavaju da se lokalnim ispitivanjem komponenata spozna krutost i čvrstoća kompozita. Za određivanje stupnja poboljšanja tla nužno je provesti ispitivanje kojim će se obuhvatiti veći volumen poboljšanog tla i odrediti njegove prosječne novonastale fizikalno-mehaničke karakteristike. Ovisno o rezultatima provedene kontrole kvalitete verificiraju se ili korigiraju odnosno ponavljaju sve prethodno navedene faze u realizaciji projekta poboljšanja tla.

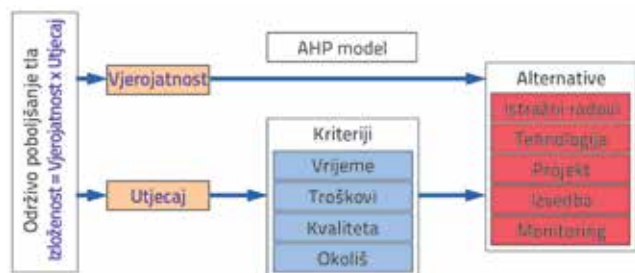
Iz svega navedenog vidljiv je uzajamni utjecaj svih identificiranih rizika, što analizu rizika čini veoma pogodnom za ANP metodu.

Za razvoj ANP modela koristit će se računalnim programom *Superdecisions* (verzija 2.0.8). Taj se model sastoji od glavne mreže i dvije podmreže. Budući da je izloženost riziku definirana kao umnožak vjerojatnosti i utjecaja rizika, glavna mreža predstavlja izloženost riziku, a podmreže predstavljaju vjerojatnost i utjecaj rizika. Podmreža *vjerojatnost rizika* sadrži samo kriterij *vjerojatnost* i pet mogućnosti odnosno ključnih rizika koji se analiziraju. Podmreža *utjecaj rizika* sadrži četiri kriterija: *vrijeme*, *troškovi*, *kvaliteta* i *okoliš* te pet mogućnosti odnosno ključnih rizika koji se analiziraju. Za svaku podmrežu se nakon upotrebe modela izračunavaju težinske vrijednosti tih mogućnosti. Da bi se dobio konačni rezultat ANP modela, tj. izloženost riziku, za svaku se mogućnost množe njene težinske vrijednosti u obje podmreže. Normaliziranjem vrijednosti izloženosti riziku za sve mogućnosti dobiva se lista prioriteta rizika.

Mrežna struktura ANP modela ovisi o modeliranju ovisnosti između klastera i elemenata odnosno kriterija i mogućnosti. U nastavku će biti prikazana tri modela koji će ilustrirati prednosti ANP modela u procjeni rizika u održivom poboljšanju. Prikazane usporedbe napravljene su primjenom Saatyve skale [46]. Koeficijenti konzistencije za svaku usporednu matricu, na svim razinama, koji se određuju pomoću svojstvene vrijednosti usporedne matrice, kao i globalni koeficijenti konzistencije, znatno su manji od 0,10. Na taj su način donesene konzistentne prosudbe na svim hijerarhijskim razinama. Sve usporedbe proveli su autori ovog rada na temelju osobnog iskustva u primjeni višekriterijskih metoda donošenja odluka u geotehničkom inženjerstvu [3, 8, 15, 23, 46 i 47].

4.1. AHP model

U slučaju da nema povratnih veza između elemenata različitih klastera i da ovisnosti idu samo u jednom smjeru, i to od elemenata više razine prema elementima niže hijerarhijske razine, odnosno od kriterija prema alternativama, ANP model se pretvara u jednostavniji oblik, a to je AHP model (slika 1.). Modeliranje se sastoji od deset usporedbi učinka pet elemenata klastera *alternative* u odnosu na jedan element klastera *vjerojatnost*, šest usporedbi učinka četiri elementa klastera *kriteriji* u odnosu na 1 element klastera *utjecaj*, te 40 usporedbi učinka pet elemenata klastera *alternative* u odnosu na četiri elementa klastera *kriteriji*.



Slika 1. Mrežna struktura AHP modela

U tablici 1. prikazana je usporedna matrica relativnih učinaka elemenata klastera *alternative* u odnosu na element klastera *vjerojatnost* te je dobiveni značaj alternativa u odnosu na *vjerojatnost* odnosno odgovarajuće vjerojatnosti pojave svakog identificiranog ključnog rizika. Zaključeno je, primjerice, da *istražni radovi* imaju 3,1 puta veću vjerojatnost od *monitoringa*, a da *projekt* ima 1,5 puta manju vjerojatnost od *izvedbe*. Vidljivo je da najveću vjerojatnost ima rizik *istražni radovi*, a najmanju rizik *monitoring*.

U tablici 2. prikazana je usporedna matrica relativnih učinaka elemenata klastera *kriteriji* u odnosu na element klastera *utjecaj* te dobiveni značaj u odnosu na klaster *utjecaj*. Zaključeno je, primjerice da *vrijeme* ima 3,3 puta veći učinak od *kvalitete*, a da *troškovi* imaju 2,5 puta manji učinak od *okoliša*. Vidljivo je da najveći učinak ima kriterij *okoliš*, a najmanji učinak kriterij *kvaliteta*. Za ilustraciju usporedbe mogućnosti u odnosu na kriterije, u tablici 3. je prikazana usporedna matrica relativnih učinaka

Tablica 1. Usporedba mogućnosti u odnosu na *vjerojatnost*

Rizik	Istražni radovi	Tehnologija	Projekt	Izvedba	Monitoring	Vektor prioriteta
Istražni radovi	1/1	1,5/1	2,5/1	1/1	3/1	0,301
Tehnologija	1/1,5	1/1	2/1	1,5/1	2,5/1	0,255
Projekt	1/2,5	1/2	1/1	1/1,5	1,5/1	0,133
Izvedba	1/1	1/1,5	1,5/1	1/1	2/1	0,213
Monitoring	1/3	1/2,5	1/1,5	1/2	1/1	0,098

Tablica 2. Usporedba kriterija u odnosu na *utjecaj*

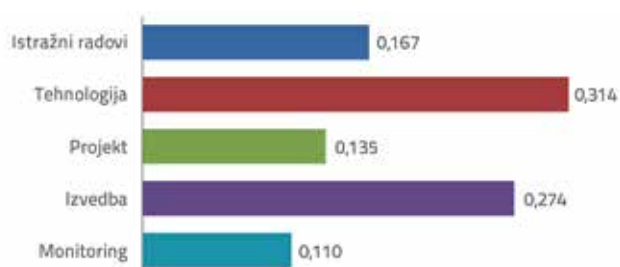
Kriteriji	Vrijeme	Troškovi	Kvaliteta	Okoliš	Vektor prioriteta
Vrijeme	1/1	2/1	3,5/1	1/1,5	0,309
Troškovi	1/2	1/1	2/1	1/2,5	0,167
Kvaliteta	1/3,5	1/2	1/1	1/5	0,086
Okoliš	1,5/1	2,5/1	5/1	1/1	0,438

Tablica 3. Usporedba mogućnosti u odnosu na kriterij *okoliš*

Rizik	Istražni radovi	Tehnologija	Projekt	Izvedba	Monitoring	Vektor prioriteta
Istražni radovi	1/1	1/4	1/1,5	1/2	1,5/1	0,109
Tehnologija	4/1	1/1	3/1	1,5/1	6/1	0,419
Projekt	1/2,5	1/3	1/1	1/2	2/1	0,143
Izvedba	1/2	1/1,5	2/1	1/1	3,5/1	0,258
Monitoring	1/3	1/6	1/2	1/3,5	1/1	0,071

elemenata klastera *mogućnosti* u odnosu na element *okoliš* klastera *kriteriji* te dobiveni učinak mogućnosti u odnosu na kriterij *okoliš*. Zaključeno je, primjerice, da *istražni radovi* imaju 1,5 puta veći učinak od *monitoringa*, a da *projekt* ima dva puta manji učinak od *izvedbe*. Vidljivo je da najveći učinak ima rizik *tehnologija*, a najmanji učinak rizik *monitoring*.

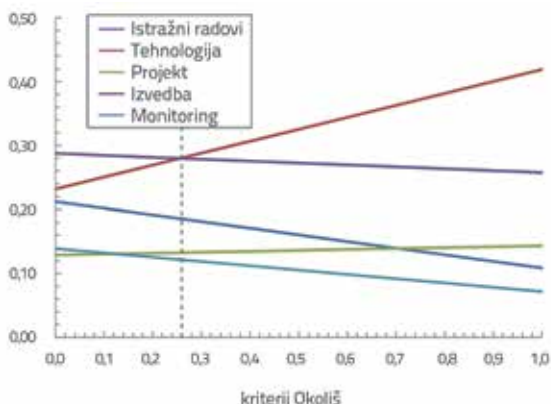
Na slici 2. prikazana je sinteza provedenih analiza za utjecaj rizika. Vidljivo je da najveći utjecaj ima rizik *tehnologija*, a najmanji rizik *monitoring*. Ividjevidljiva slabost hijerarhijskog modela jer je bilo očito da će rizik neodgovarajućeg odabira tehnologije odnosno rizik *tehnologija* dobiti najveći učinak u odnosu na Utjecaj rizika jer ima najveći učinak u odnosu na kriterij *okoliš* (tablica 3.), a kriterij *okoliš* ima najveći učinak na *utjecaj* rizika (tablica 2.).



Slika 2. Ujecaj rizika dobiven AHP modelom

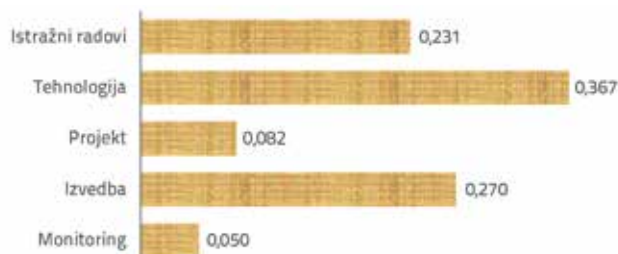
Na slici 3. prikazana je analiza osjetljivosti kod koje je variran utjecaj kriterija *okoliš* na *utjecaj* rizika. Analiza je pokazala da

bi tek sa smanjenjem učinka kriterija *okoliš* sa 42 % na 26 % rizik *tehnologija* dobio veći učinak od rizika *izvedba*.



Slika 3. Analiza osjetljivosti promjene učinka kriterija *okoliš* u odnosu na *utjecaj* rizika

Na slici 4. prikazana je izloženost riziku izračunana kao normalizirani umnožak vektora prioriteta *vjerojatnosti*, prikazanog u tablici 1. i *utjecaja* rizika dobivenog AHP modelom, prikazanog na slici 2. Rezultati AHP modela pokazuju da najviše sredstava treba predvidjeti za upravljanje rizikom *tehnologija* (36.7 %), zatim slijede *izvedba* (27.0 %), *istražni radovi* (23.1), *projekt* (8.2 %) i na kraju *monitoring* (5.0 %).



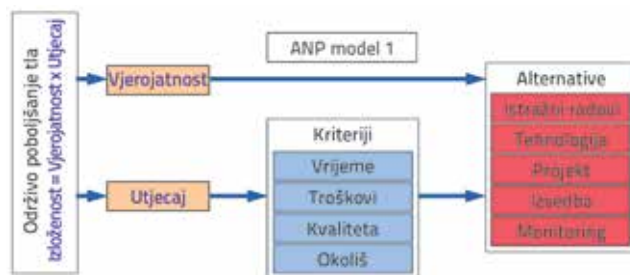
Slika 4. Izloženost riziku dobivena AHP modelom

4.2. ANP model 1 s vanjskom ovisnošću

Da bi se pouzdanije donosile odluke i izbjegli opisani nedostaci hijerarhijskog modela, uspostaviti će se povratna veza, odnosno ovisnost elemenata klastera *kriteriji* u odnosu na elemente klastera *alternative* u podmreži *utjecaj*. Modeliranje se nadograđuje sa 30 usporedbi učinaka četiri elementa klastera *kriteriji* u odnosu na pet elemenata klastera *alternative* (slika 5.).

Tablica 4. Usporedba kriterija u odnosu na alternativu *tehnologija*

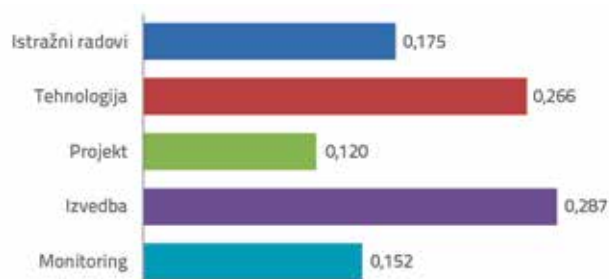
Kriteriji	Vrijeme	Troškovi	Kvaliteta	Okoliš	Vektor prioriteta
Vrijeme	1/1	1/2	1/1,5	1/2,5	0,144
Troškovi	2/1	1/1	1,5/1	1/1	0,312
Kvaliteta	1/3,5	1/1,5	1/1	1/1,5	0,214
Okoliš	1,5/1	1/1	1,5/1	1/1	0,330



Slika 5. Mrežna struktura ANP modela s vanjskom ovisnošću

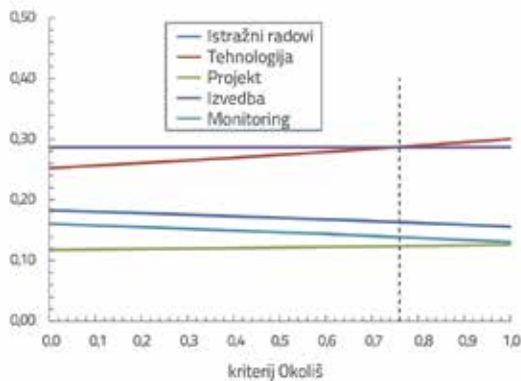
Za ilustraciju usporedbe kriterija u odnosu na mogućnosti, u tablici 4. je prikazana usporedna matrica relativnih učinaka elemenata klastera *kriteriji* u odnosu na element *tehnologija* klastera *alternative* te dobiveni učinak kriterija u odnosu na mogućnost *tehnologija*. Ova ilustracija je odabrana jer je u AHP modelu rizik *tehnologija* imao najveći utjecaj. Zaključeno je, primjerice da *troškovi* imaju 1,5 puta veći učinak od *kvalitete*, a da *vrijeme* ima 2.5 puta manji učinak od *okoliša*. Vidljivo je da najveći učinak ima kriterij *okoliš*, a najmanji učinak kriterij *vrijeme*.

Na slici 6. prikazana je sinteza provedenih analiza za *utjecaj* rizika. Sada je vidljivo da je došlo do promjene na vrhu liste prioriteta rizika zahvaljujući povratnoj vezi. Sada najveći utjecaj ima rizik *izvedba*, dok najmanji utjecaj ima rizik *projekt*. Do promjene je došlo jer kriterij *vrijeme* ima najmanji učinak u odnosu na mogućnost *tehnologija*, odnosno odabir neodgovarajuće tehnologije najmanje utječe na produženje roka izvedbe radova.



Slika 6. Utjecaj rizika dobiven ANP modelom 1 s vanjskom ovisnošću

Na slici 7. prikazana je analiza osjetljivosti kod koje je variran utjecaj kriterija *okoliš* na rizik *tehnologija*. Analiza je pokazala da bi tek s povećanjem učinka *okoliša* sa 34 % na 76 % rizik *tehnologija* zadržao veći utjecaj od rizika *izvedba* kao što ga je imao u AHP analizi.



Slika 7. Analiza osjetljivosti promjene učinka kriterija *okoliš* u odnosu na rizik *tehnologija*

Na slici 8. prikazana je izloženost riziku izračunana kao normalizirani umnožak vektora prioriteta *vjerojatnosti*, prikazanog u tablici 1. i *utjecaja* rizika dobivenog ANP modelom 1, prikazanog na slici 6.



Slika 8. Izloženost riziku dobivena ANP modelom 1 s vanjskom ovisnošću

Tablica 5. Usporedba mogućnosti u odnosu na mogućnost *izvedba*

Rizik	Istražni radovi	Tehnologija	Projekt	Monitoring	Vektor prioriteta
Istražni radovi	1/1	4/1	4/1	2/1	0.500
Tehnologija	1/4	1/1	1/1	1/2	0.125
Projekt	1/4	1/1	1/1	1/2	0.125
Monitoring	1/2	2/1	2/1	1/1	0.250

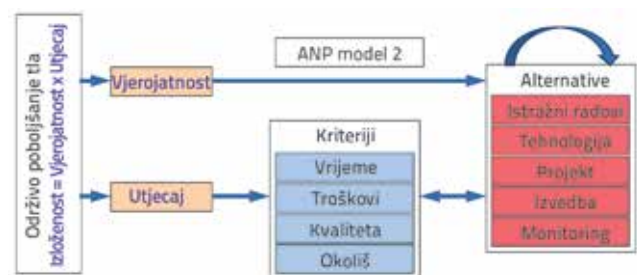
Tablica 6. Neponderirana supermatrica sa svim provedenim usporedbama

	Istražni radovi	Tehnologija	Projekt	Izvedba	Monitoring	Vrijeme	Troškovi	Kvaliteta	Okoliš	Cilj
Istražni radovi	0,000	0,119	0,140	0,500	0,226	0,210	0,300	0,050	0,109	0,000
Tehnologija	0,300	0,000	0,380	0,125	0,207	0,180	0,370	0,150	0,419	0,000
Projekt	0,200	0,059	0,000	0,125	0,117	0,140	0,150	0,050	0,143	0,000
Izvedba	0,400	0,584	0,290	0,000	0,450	0,360	0,070	0,450	0,257	0,000
Monitoring	0,100	0,238	0,190	0,250	0,000	0,110	0,110	0,300	0,072	0,000
Vrijeme	0,330	0,144	0,460	0,400	0,190	0,000	0,000	0,000	0,000	0,303
Troškovi	0,500	0,312	0,310	0,080	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,172
Kvaliteta	0,060	0,214	0,080	0,360	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,091
Okoliš	0,110	0,330	0,150	0,160	0,060	0,000	0,000	0,000	0,000	0,434
Cilj	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Iako je došlo do promjene *utjecaja* za sve rizike, rezultati ANP modela s vanjskom ovisnošću pokazuju da je ili nije došlo do promjene rasporeda na rang-listi prioriteta rizika zato što rizik *tehnologija* ima znatno veću vjerojatnost od rizika *izvedba*. Najviše sredstava treba predvidjeti za upravljanje rizikom *tehnologija* (31.9 %), zatim slijede *izvedba* (28.8 %), *istražni radovi* (24.7 %), *projekt* (7.5 %) i na kraju *monitoring* (7.1 %).

4.3. ANP model 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću

Najpotpunije i najpouzdanije donošenje odluka ostvarit će se dodavanjem unutarnje ovisnosti između elemenata klastera *alternative* pod mreži *utjecaj*. Modeliranje se nadograđuje sa 30 usporedbi učinka pet elemenata klastera *alternative* u odnosu na svaki od njih (slika 9.).



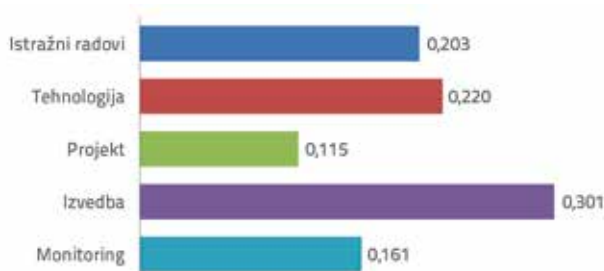
Slika 9. Mrežna struktura ANP modela s vanjskom i unutarnjom ovisnošću

Za ilustraciju usporedbe mogućnosti u odnosu na svaku od njih, u tablici 5 je prikazana usporedna matrica relativnih

učinaka elemenata klastera *alternative* u odnosu na element *izvedbate* dobiveni učinak mogućnosti u odnosu na mogućnost *izvedba*. Ova ilustracija je odabrana jer je u ANP modelu 1 rizik *izvedba* imao najveći utjecaj. Zaključeno je, primjerice, da *istražni radovi* imaju dva puta veći učinak *monitoringa*, a da *tehnologija* ima isti učinak kao i *projekt*. Vidljivo je da najveći učinak ima alternativa *istražni radovi*, a najmanji mogućnost *projekt* i *tehnologija*.

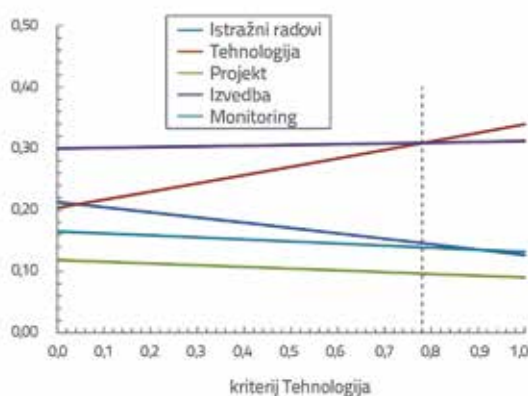
U tablici 6. prikazana je neponderirana tzv. supermatrica koja sadrži težine odnosno prioritete dobivene uspoređivanjem elemenata u parovima u skladu sa zavisnostima između elemenata za sve prikazane modele.

Na slici 10. prikazana je sinteza provedenih analiza za *utjecaj rizika*. Vidljivo je da je još više porastao utjecaj rizika *izvedba* u odnosu na rizik *tehnologija*. Najveći utjecaj ima rizik *izvedba*, dok sada najmanji utjecaj ima rizik *projekt*.



Slika 10. Utjecaj rizika dobiven ANP modelom 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću

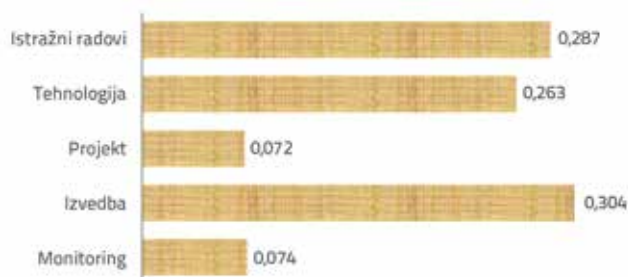
Na slici 11. prikazana je analiza osjetljivosti kod koje je variran utjecaj rizika *tehnologija* na rizik *izvedba*. Analiza je pokazala da bi tek sa povećanjem učinka *tehnologije* sa 22 % na 78 % rizik *tehnologija* zadržao veći učinak od rizika *izvedba* kao što ga je imao u AHP analizi.



Slika 11. Analiza osjetljivosti promjene učinka rizika *tehnologija* u odnosu na rizik *izvedba*

Na slici 12. prikazana je *izloženost riziku* izračunana kao normalizirani umnožak vektora prioriteta *vjerojatnosti*, prikazanog u tablici 1. i utjecaja rizika dobivenog ANP model 2

prikazanog na slici 9. Rezultati ANP modela s vanjskom i unutarnjom ovisnošću pokazuju da je došlo do promjene rasporeda na rang-listi rizika te da sada najviše sredstava treba predvidjeti za upravljanje rizikom *izvedba* (30.4%), zatim slijede *istražni radovi* (28.7%), *tehnologija* (26.3%), *projekt* (7.2%) i na kraju *monitoring* (7.4%).



Slika 12. Izloženost riziku dobiven ANP modelom 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću

5. Rasprava

U suvremenom građevinarstvu sve učestalije se javlja potreba za temeljenjem teških građevina u tlu nedostatne nosivosti i krutosti. Donošenje odluke o načinu temeljenja u takvim okolnostima ovisi o sustavnom proučavanju cijelog niza utjecajnih faktora, adekvatnosti i kvaliteti informacija, broju mogućnosti između kojih se može birati te o primjeni odgovarajućih modela i tehnika za izbor optimalne, odnosno najpovoljnije mogućnosti. Jedno od mogućih rješenja je poboljšanje tla. Poboljšanje mehaničkih karakteristika tla postiže se raznim tehnolojskim postupcima zbijanja i miješanja postojećeg tla uz pomoć različitih vrsta veziva. Prirodno tlo se na taj način pretvara u novi materijal o čijoj kvaliteti ovisi daljnja sigurnost građevine.

Kao vezivo u postupku miješanja tla najčešće se primjenjuju cement i vapno koji troše velike količine prirodne sirovine i fosilnih goriva i oslobađaju veliku količinu CO₂ u atmosferu. Svako smanjenje potrošnje cementa i vapna smanjuje i emisiju CO₂ te omogućuje održivo poboljšanje tla. To se postiže uvođenjem sintetičnih veziva, takozvanih geopolimera, upotrebom otpadnih materijala iz drugih industrijskih procesa kao što su zgura i leteći pepeo. Odabirom ekološki prihvatljivog sintetičnog veziva, odabirom odgovarajuće temeljne konstrukcije te kontrolom kvalitete uspješnosti poboljšanja moguće je kvantificirati uspješnost izvedenih zahvata i upravljati rizikom.

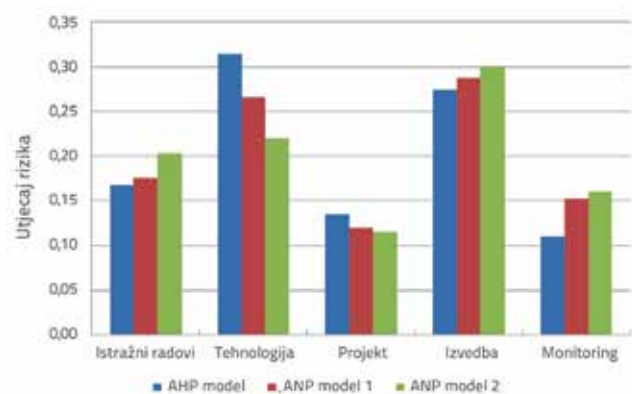
Rizici se pojavljuju u svim fazama građevinskog projekta pa tako i u projektima temeljenja kod kojih se primjenjuje održivo poboljšanje tla. Za svaki identificirani rizik, tijekom trajanja projekta, provodi se procjena rizika. Upravljanje rizicima je u svojoj prirodi ciklični proces. Rizike treba identificirati prije početka realizacije projekta ili neke faze kroz koju projekt prolazi. Okruženje u kojem se realizira projekt producira nove izvore rizika za vrijeme njegove realizacije. Nove rizike treba analizirati zajedno s prije identificiranim i analiziranim rizicima

u neprekidnom pokušavanju da se procijeni vjerojatnost i štetno djelovanje novonastalih rizika u odnosu na postojeće. To stvara potrebu za kontinuiranim upravljanjem rizicima u svim fazama realizacije projekta.

Procjena rizika provodi se određivanjem izloženosti riziku. Izloženost riziku predstavlja umnožak vjerojatnosti i utjecaja rizika. Određivanjem izloženosti za sve identificirane rizike i njihovim stavljanjem u međusobni odnos uspostavlja se lista prioriteta rizika. Ovisno o položaju rizika u listi prioriteta bit će angažirana odgovarajuća sredstva za predviđeni odgovor na rizik. Lista rizika kao rezultat procjene rizika može se odrediti kvantitativnom ili kvalitativnom analizom. Za kvantitativnu analizu potrebno je raspolagati odgovarajućom bazom podataka o prije izvedenim projektima koja bi omogućila izravno izračunavanje izloženosti riziku. Kako to u stvarnom životu najčešće nije slučaj, primjenjuje se kvalitativna analiza u kojoj se donose više ili manje konzistentne prosudbe na temelju kojih se onda određuje izloženost riziku.

Za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla primijenjen je analitički mrežni proces koji se ubraja u skupinu metoda za višekriterijsku analizu. ANP svodi višedimenzionalni problem donošenja odluka na nelinearnu "povratnu" mrežnu strukturu. Mreža se sastoji od klastera i elemenata odnosno čvorova unutar klastera. Omogućena je interakcija između elemenata jednog klastera (unutarnja ovisnost) kao i između elemenata različitih klastera (vanjska ovisnost). Međusobna ovisnost mrežnih elemenata omogućava bolje modeliranje kompleksnih problema iz stvarnog života. Funkcionalnom interakcijom između kriterija i alternativa u modelu postiže se veća stabilnost rezultata analize. To čini ANP posebno pogodnim za *procjenu* rizika.

Procjena rizika provedena je uz pomoć hijerarhijskog ANP modela, mrežnog ANP modela 1 s vanjskom ovisnošću i mrežnog ANP modela 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću. Rezultat procjene rizika je izloženost riziku koja za svaki identificirani ključni rizik predstavlja umnožak *vjerojatnosti i utjecaja rizika*. Vjerojatnosti za svaki rizik su neovisne varijable. U sva tri modela imaju hijerarhijsku strukturu i daju iste rezultate. Prednosti ANP modela očitovale su se u promjeni vrijednosti *utjecaja rizika* u sva tri modela. Na slici 13. prikazani su dobiveni utjecaji rizika za sva tri modela.



Slika 13. Utjecaj rizika za sva tri analizirana modela

Model ANP je pokazao da dominantan utjecaj na održivo poboljšanje tla imaju neodgovarajući odabir tehnologije poboljšanja tla i nezadovoljavajuću izvedbu radova poboljšanja tla. Najveći utjecaj zbog hijerarhijske strukture očekivano ima neodgovarajući odabir tehnologije poboljšanja tla jer on ima najveći učinak u odnosu na kriterij *okoliš*, a kriterij *okoliš* ima najveći učinak na kriterij *utjecaj*.

ANP model 1 s vanjskom ovisnošću je proširio ANP model uvodeći međusobni interakcijski utjecaj kriterija i alternativa na održivo poboljšanje tla. Dominantnu ulogu i dalje imaju neodgovarajući odabir tehnologije poboljšanja tla i nezadovoljavajuća izvedba radova poboljšanja tla. Došlo je do promjene na vrhu rang-liste rizika, pa sada najveći utjecaj ima nezadovoljavajuća izvedba radova poboljšanja tla. Tu se pokazala prednost ANP modela jer se može očekivati da će nezadovoljavajuća izvedba radova poboljšanja tla znatno više produžiti trajanje projekta nego što će utjecati na okoliš. To je znatno manje izraženo kod neodgovarajućeg odabira tehnologije poboljšanja tla. Posebno zanimljiv rezultat ANP modela 1 jest povećanje utjecaja neadekvatno obavljenih istražnih radova, nezadovoljavajuće izvedbe radova i nezadovoljavajućeg monitoringa kvalitete izvedenih radova uz istodobno smanjenje utjecaja neodgovarajućeg odabira tehnologije i lošeg projektiranja. Ovo bi također moglo pokazivati prednost primjene mrežnog modela s povratnim vezama. Svi rizici kojima se povećava utjecaj zbivaju se na terenu i u njima sudjeluje velik broj ljudi. Zato se može očekivati veći utjecaj tih rizika kad se uzmu u obzir povratne veze između rizika i kriterija. Rizici kojima se smanjuju utjecaji zbivaju se u uredu i u njima sudjeluje nekolicina ljudi. Može se očekivati smanjenje utjecaja tih rizika uzimanjem u obzir povratnih veza.

ANP model 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću proširio je ANP model 1 uvodeći međusobni interakcijski utjecaj rizika na održivo poboljšanje tla. Dominantnu ulogu sada ima samo nezadovoljavajuća izvedba radova, dok se neodgovarajući odabir tehnologije poboljšanja tla gotovo izjednačio s neadekvatno obavljanim istražnim radovima. Rezultati ANP modela 2 pokazuju daljnji porast utjecaja rizika koji se zbivaju na terenu i u njima sudjeluje velik broj ljudi u odnosu na rizike koji se zbivaju u kancelariji i u kojima sudjeluje nekolicina ljudi. Ovakvi rezultati pokazuju da analitički modeli, združeni s iskustvom i intuicijom dovode do stabilnog donošenja odluka pri procjeni rizika u održivom poboljšanju tla.

Sve provedene analize osjetljivosti pokazale su izrazitu stabilnost rezultata odlučivanja.

6. Zaključak

Primjena ANP-a za procjenu rizika u održivom poboljšanju tla prikazana je na primjeru buduće izgradnje trgovačkog centra temeljenog u slojevima jako stišljivih glina i organskog tla. Predviđeno je objekt izgraditi neposredno uz obalu rijeke, pa poboljšanje tla može postati velik ekološki

problem ako bi došlo do onečišćenja. Identificirani su ključni rizici kod održivog poboljšanja tla koji predstavljaju alternative u ANP modelu. Model se sastoji od glavne mreže i dvije podmreže. Glavna mreža predstavlja izloženost riziku, a podmreže predstavljaju vjerojatnost i utjecaj na rizik. Podmreža *vjerojatnost* rizika sadrži samo kriterij *vjerojatnost* i pet mogućnosti odnosno ključnih rizika koji se analiziraju. Podmreža *utjecaj* rizika sadrži četiri kriterija: vrijeme, trošak, kvalitetu i okoliš te pet mogućnosti odnosno ključnih rizika koji se analiziraju. O zadanim ovisnostima između klastera i elemenata odnosno kriterija i mogućnosti ovisi složenost ANP modela. Razvijena su tri modela koji su ilustrirali prednosti ANP u analizi rizika i održivom poboljšanju tla. Procjena rizika provedena je uz pomoć hijerarhijskog AHP modela, mrežnog ANP modela 1

s vanjskom ovisnošću i mrežnog ANP modela 2 s vanjskom i unutarnjom ovisnošću.

AHP model je pokazao da najveći utjecaj na održivo poboljšanje tla ima neodgovarajući odabir tehnologije poboljšanja tla, a zatim nezadovoljavajuća izvedba radova poboljšanja tla. ANP modeli su promijenili ovaj redoslijed. Rezultati složenijih ANP modela pokazali su porast utjecaja rizika koji nastaju na terenu i u kojima sudjeluje velik broj ljudi u odnosu na rizike koji nastaju u uredu i u kojima sudjeluje nekolicina ljudi. Mrežni modeli rezultirali su stabilnijem donošenju odluka i većoj prilagodbi stvarnom životu i zdravorazumskim očekivanjima. Analize osjetljivosti pokazale su izrazitu stabilnost dobivene rang liste prioriteta rizika. Moguća potvrda ovih nastojanja dobit će se primjenom analitičkog mrežnog procesa u budućim istraživanjima održivog poboljšanja tla.

LITERATURA

- [1] Yee, K., Ooi, T.A.: *Ground Improvement – A Green Technology towards a Sustainable Housing, Infrastructure and Utilities Developments in Malaysia*, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 41, pp. 1-20, 2010.
- [2] Madhyannapu, R.S., Puppala, A.J., Nazarian, S., Yuan, D.: *Quality Assessment and Quality Control of Deep Soil Mixing Construction for Stabilizing Expansive Subsoils*, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 136, pp. 119-129, 2010.
- [3] Cerić, A., Kovačević, M.S.: *Ground Improvement in Large Infrastructure Projects – Croatian Experience, Proceeding of the Second International Conference on Construction In Developing Countries, (ICCIDC-II)*, Kairo, pp. 615-622, 2010.
- [4] McLellan, B.C., Williams, R.P., Lay, J., Riessen, A., Corder, G.D.: *Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement*, Journal of Cleaner Production, 19, pp. 1080-1090, 2011.
- [5] Sreevidya, V., Anuradha, R., Venkatasubramani, R.: *Study on Fly Ash Geopolymer Concrete to Reduce Global Warming Gases*, Nature, Environment and Pollution Technology, 9, pp. 383-387, 2010.
- [6] Habert, G., Lacaille, J.B., Roussela, N.: *An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends*, Journal of Cleaner Production, 19, pp. 1229-1238, 2011.
- [7] Kovačević, M.S., Simović, R., Bjegović, D., Rosković, R., Peček, N.: *Soil improvement with nano waste particles*, Proceedings of the International Symposium: Non-Traditional Cement & Concrete III, Brno, pp. 362-371, 2008.
- [8] Cerić, A.: *Investment into New Technology under Uncertainty Conditions, Proceeding of the Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V)*, Istanbul, pp. 196-193, 2009.
- [9] Tang, X., Jang, J.: *Long-Term Risk Reduction of Lead-Contaminated Urban Soil by Phosphate Treatment*, Environmental Engineering Science, 26, pp. 1747-1754, 2009.
- [10] Marcher, T., Aydogmus, T., John, M., Fowler, M.E.: *Design approach for the hybrid underground station at Union Square/ Market Street in San Francisco*, Geomechanics and Tunneling, 2, pp. 387-399, 2009.
- [11] Fuchsman, P., Lyndall, J., Bock, M., Lauren, D., Barber, T., Leigh, K., Perruchon, E., Capdevielle, M.: *Terrestrial ecological risk evaluation for triclosan in land-applied biosolids*, Integrated Environmental Assessment and Management, 6, pp. 405-418, 2010.
- [12] Kirman, C., Budinsky, R.A., Yost, L., Baker, B.F., Zabik, J.M., Rowlands, J.C., Long, T.F., Simon, T.: *Derivation of Soil Clean-Up Levels for 2,3,7,8-Tetrachloro-dibenzo-p-dioxin (TCDD) Toxicity Equivalence (TEQ_{DIOX}) in Soil Through Deterministic and Probabilistic Risk Assessment of Exposure and Toxicity*, Human and Ecological Risk Assessment, 17, pp. 125-128, 2011.
- [13] Tang, Z.Q., Wu, H.M., Bian, Y.W.: *A Case Library Creating Method Based on Risk Control of Tunnel Engineering*, Advanced Materials Research, 323, pp. 151-156, 2011.
- [14] Dikmen, I., Birgonul, M.T., Ozorhon, B.: *Project Appraisal and selection using the Analytical Network Process*, Canadian Journal of Civil Engineering, 34, pp. 786-792, 2007.
- [15] Cerić, A., Marić, T.: *Određivanje prvenstva pri upravljanju rizicima građevinskih projekata*, GRAĐEVINAR 63 (2011) 3, pp. 265-271.
- [16] Cioffi, D.F., Khamooshi, H.: *A practical method of determining project risk contingency budgets*, Journal of the Operational Research Society, 60, pp. 565-571, 2009.
- [17] Zavadaskas, E.K., Turskis, Z., Tamošaitiene, J.: *Risk Assessment of Construction Projects*, Journal of Civil Engineering and Management, 16, pp. 33-46, 2010.
- [18] Seifert, I., Thieken, A.H., Merz, M., Borst, D., Werner, U.: *Estimation of industrial and commercial asset values for hazard risk assessment*, Natural Hazards, 52, pp. 453-479, 2010.
- [19] Karimi Azari, A.R., Mousavi, N., Mousavi, S.F., Hosseini, S.B.: *Risk assessment model selection in construction industry*, Expert Systems with Applications, 38, pp. 9105-9111, 2011.

- [20] Li, J., Zou, P.X.W.: *A Fuzzy AHP Based Risk Assessment Methodology for PPP Projects*, Journal of Construction Engineering and Management, 137, pp. 1205-1209, 2011.
- [21] Jaafari, A.: *Management of Risks, Uncertainties, and Opportunities on Projects: Time for a Fundamental Shift*, International Journal of Project Management, 19, pp. 89-101, 2001.
- [22] Taroun, A., Yang, J.B., Lowe, D.: *Construction Risk Modelling and Assessment: Insights from a Literature Review*, The Built & Human Environment Review, 1, pp. 87-97, 2011.
- [23] Cerić, A., Marčić, D., Ivandić, K.: *A Risk Assessment Methodology in Tunneling*, Technical Gazette, 18, pp. 526-536, 2011.
- [24] Project Management Institute (PMI): *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), Third Edition*, Project Management Institute Publishing Division, 2004.
- [25] Fu, G., Butler, D., Khu, S.T.: *Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems*, Environmental Modelling & Software, 23, pp. 225-234, 2008.
- [26] Levner, E., Ganoulis, J., Alcaide López de Pablo, D., Linkov, I.: *Sustainable Management of Water Resources and Minimization of Environmental Risks A Multi-Portfolio Optimization Model*, Earth and Environmental Science, 3, pp. 329-348, 2010.
- [27] Argent, R.M., Perraud, J.M., Rahman, J.M., Grayson, R.B., Podger, G.M.: *A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems*, Environmental Modelling & Software, 24, pp. 809-818, 2009.
- [28] Linkov, I., Loney, D., Cormier, S., Satterstrom, S.F., Bridges, T.: *Weight-of-evidence evaluation in environmental assessment: Review of qualitative and quantitative approaches*, Science of The Total Environment, 407, pp. 5199-5205, 2009.
- [29] Chen, Z., Zhao, L., Lee, K.: *Environmental risk assessment of offshore produced water discharges using a hybrid fuzzy-stochastic modeling approach*, Environmental Modelling & Software, 25, pp. 782-792, 2010.
- [30] Saaty, T.L.: *Fundamentals of the analytic network process: dependence and feedback in decision-making with a single network*, Journal of Systems Science and Systems Engineering, 13, pp. 129-157, 2004.
- [31] Saaty, T.L.: *Theory and Applications of the Analytic Network Process*. RWS Publications, Pittsburgh, 2005.
- [32] Saaty, T.L.: *Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes*, European Journal of Operational Research, 168, pp. 557-570, 2006.
- [33] Saaty, T.L.: *Time dependent decision - making; dynamic priorities in the AHP/ANP*. Generalizing from points to functions and from real to complex variables, Mathematical and Computer Modelling, 7-8, pp. 860-891. 2007.
- [34] Saaty, T.L.: *The analytic network process*, Iranian Journal of Operations Research, 1, pp. 1-27, 2008.
- [35] Wolfslehner, B., Vacik, H.: *Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure-state-response framework*, Journal of Environmental Management, 88, pp. 1-10. 2008.
- [36] Tsai, W.H., Chou, W.C.: *Selecting management systems for sustainable development in SMEs: A novel hybrid model based on DEMATEL, ANP, and ZOGP*, Expert Systems with Applications, 36, pp. 1444-1458, 2009.
- [37] Liu, K.F.R., Yu, C.W.: *Integrating case-based and fuzzy reasoning to qualitatively predict risk in an environmental impact assessment review*, Environmental Modelling & Software, 24, pp. 1241-1251, 2009.
- [38] Bottero, M., Ferretti V.: *Integrating the Analytic Network Process (ANP) and the Driving force- Pressure-State-Impact- Responses (DPSIR) Model for the Sustainability Assessment of Territorial Transformations*, International Journal of Management of Environmental Quality, 21, pp. 618-644, 2010.
- [39] Bottero, M., Comino, E., Riggio, V., 2011. *Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems*. Environmental Modelling & Software 26, 1211-1224.
- [40] Dikmen, I., Birgonul, M.T., Ozorhon, B.: *Project Appraisal and selection using the Analytical Network Process*, Canadian Journal of Civil Engineering, 34, pp. 786-792, 2007.
- [41] Bu-Qammar, A.S., Dikmen, I., Birgonul, M.T.: *Risk assessment of international construction projects using the analytic network process*, Canadian Journal of Civil Engineering, 36, pp. 1170-1181, 2009.
- [42] Liu, K.F.R., Lai, J.H.: *Decision-support for environmental impact assessment: a hybrid approach using fuzzy logic and fuzzy analytic network process*, Expert Systems with Applications, 36, pp. 5119-5136, 2009.
- [43] Yiang, H., Ruan, J.: *Investment Risks Assessment on High-tech Projects Based on Analytic Hierarchy Process and BP Neural Network*, Journal of networks, 4, pp. 393-402, 2010.
- [44] Wang, H.J., Zeng, Z.T.: *A multi-objective decision-making process for reuse selection of historic buildings*, Expert Systems with Applications, 37, pp. 1241-1249, 2010.
- [45] Ergu, D., Kou, G., Shi, Y., Shi, Y.: *Analytic network process in risk assessment and decision analysis*, Computers and Operations Research, doi:10.1016/j.cor.2011.03.005, 2011.
- [46] Cerić A., Katavić M.: *Upravljanje održavanjem zgrada*, Građevinar, 53, pp. 83-89, 2011.
- [47] Marčić, D., Cerić, A. Kovačević, M.S.: *Selection of a Field Testing Method for Karst Rock Mass Deformability by Multi Criteria Decision Analysis*, Journal of Civil Engineering and Management, 19, pp 195-205, 2013.