

Primljen / Received: 5.7.2024.
Ispravljen / Corrected: 11.9.2024.
Prihvaćen / Accepted: 16.9.2024.
Dostupno online / Available online: 10.1.2025.

Sustavni pregled identifikacije, procjene i ublažavanja sigurnosnih rizika u visokogradnji

Autori:



Wei Rui Lei, dipl.ing.građ.

Sveučilište Kebangsaan, Malezija
Fakultet inženjerstva i izgrađenog okoliša
Odjel za građevinarstvo
p136929@siswa.ukm.edu.my



Izv.prof.dr.sc. **Muhamad Azry Khoiry**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Kebangsaan, Malezija
Fakultet inženjerstva i izgrađenog okoliša
Centar za istraživanje pametnih i održivih naselja
azrykhoiry@ukm.edu.my

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Azrul A Mutalib**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Kebangsaan, Malezija
Fakultet inženjerstva i izgrađenog okoliša
Centar za istraživanje pametnih i održivih naselja
azrulaam@ukm.edu.my

Pregledni rad

Wei Rui Lei, Muhamad Azry Khoiry, Azrul A Mutalib

Sustavni pregled identifikacije, procjene i ublažavanja sigurnosnih rizika u visokogradnji

Građevinska industrija ima velik udio u nacionalnome BDP-u, no to je jedan od najopasnijih industrijskih sektora na svijetu. Postojeće su studije neadekvatno prikazale istraživanja vezana uz sigurnosne rizike u visokogradnji i zato ovo istraživanje nudi sustavni pregled rizika za život i zdravlje radnika u visokogradnji od 2004. do 2024. Prvo, istražuju se uzroci nesreća i čimbenici rizika koji ugrožavaju sigurnost i zdravlje na radu. Riječ je o osam glavnih čimbenika i 60 podčimbenika. Drugo, istražuju se metode procjene za ocjenjivanje i rangiranje tih čimbenika rizika, od kojih je razrađeno devet tipičnih metoda. Konačno, uspostavljen je tehnički okvir za ublažavanje osam glavnih čimbenika rizika za sigurnost čime je omogućeno stručnjacima za zaštitu na radu pristup najsvremenijim tehnologijama i metodama u građevinskoj industriji. Također, ovo istraživanje nudi prijedloge i buduće smjernice za rješavanje nedostataka trenutačnih mjera ublažavanja kako bi se sigurnost u građevinarstvu održivo poboljšala.

Ključne riječi:

građevinska industrija, visokogradnja, sigurnosni rizik, identifikacija, procjena, mjere za ublažavanje

Subject review

Wei Rui Lei, Muhamad Azry Khoiry, Azrul A Mutalib

Systematic review of the identification, assessment, and mitigation of safety risks in high-rise building construction

The construction industry accounts for a large proportion of the national GDP; however, it is one of the world's most dangerous industrial sectors. Existing studies have inadequately reviewed safety risk-related research in high-rise building construction. Therefore, this study conducts a systematic review of safety risks in high-rise building construction from 2004 to 2024. First, the paper presents investigates the causes of accidents and risk factors that endanger occupational safety and health, comprising 8 main factors and 60 sub-factors. Second, the paper explores the assessment methods for evaluating and ranking these safety risk factors, of which nine typical methods are elaborated. Finally, a technical framework for mitigating the eight main safety risk factors is established in paper, providing safety practitioners with access to cutting-edge technologies and methods in the construction industry. Furthermore, this study provides suggestions and future directions for addressing the drawbacks of current mitigation measures to sustainably improve building construction safety.

Key words:

construction industry, high-rise building, safety risk, identification, assessment, mitigation measures

1. Uvod

Građevinarstvo je jedan od najvećih svjetskih industrijskih sektora, koji čini veliki udio u nacionalnom bruto domaćem proizvodu (BDP), na primjer, 6,9 % u Kini [1] i 15,3 % u UK [2]. U mnogim zemljama u razvoju građevinarstvo je među najbrže rastućim područjima na tržištu rada. Iako građevinska industrija daje značajan gospodarski doprinos poboljšanju ukupnog BDP-a, smatra se jednim od najopasnijih industrijskih sektora na svijetu [3, 4], s 30 do 40 % smrtnih ozljeda. U SAD-u, prema Uredu za statistiku rada [5], građevinska industrija čini drugi najveći udio (19,5 %) smrtnih slučajeva na radnom mjestu. Podaci iz nekoliko industrijalizovanih zemalja pokazuju da građevinski radnici imaju tri do četiri puta veću vjerojatnost da će umrijeti od nesreća nego ostali radnici. U zemljama u razvoju smrtni rizici mogu biti tri do šest puta veći [3].

Zbog prenapučenosti urbanih područja gradnja se sve više usmjerava na visoke zgrade [7]. Prema Nacionalnoj udruzi za zaštitu od požara (NFPA), u SAD-u se zgrade više od 23 m ili sedam katova smatraju visokim zgradama [4]. Prema *Uniform Standard for Civil Building Design* (GB50352-2019), visoka zgrada definirana je kao zgrada čija je visina veća od 27 m [8]. Ovaj rad prihvaća 27 m kao definiciju za visoku zgradu. Sigurnost se odnosi na slobodu od opasnosti, štete i ozljeda osobe uključene u građevinske aktivnosti. Tradicionalno se rizik definira kao mjera vjerojatnosti i ozbiljnosti štetnih učinaka. Mondarres et al. [9] definiraju rizik kao vjerojatnost događanja slučaja i veličinu njegovih posljedica.

Rizik = (S, P, C)

gdje je S scenarij koji vodi do nesreće (eng. *Scenario leading to the hazard*), P vjerojatnost događanja (eng. *Probability of occurrence*), a C posljedice, tj štetnost (eng. *Consequence i.e severity*).

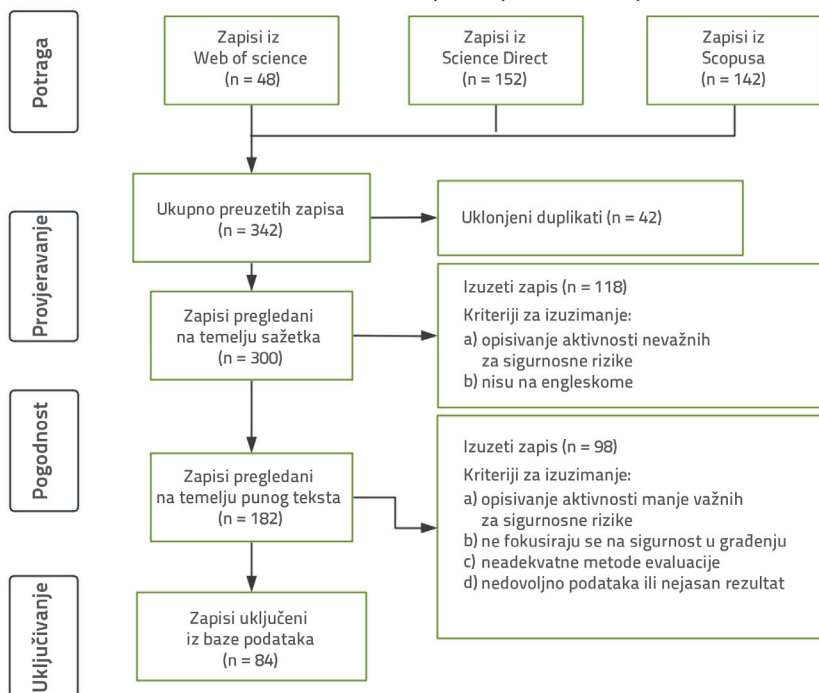
Afzan [10] sažeo je pet glavnih čimbenika rizika za visoke zgrade, a to su vanjska motivacija, motivacija menadžmenta, motivacija za sigurnost, motivacija na radnome mjestu i motivacija za rad. Lubega et al. [11] proveli su slično istraživanje koje je otkrilo da su uzroci građevinskih nesreća u Ugandi nedostatak znanja o sigurnosnim pravilima, angažiranje neiskusne radne snage i nedostatak poštivanja sigurnosti. Tam et al. [12] složili su se s tim mišljenjem i sugerirali da su glavni čimbenici koji utječu na sigurnost u Kini duboki nedostaci u svijesti menadžera o sigurnosti, nedostatak sigurnosne obuke, nepromišljene operacije i averzija prema dodjeli resursa za sigurnosne mjere.

Nadalje, istraživanje koje je proveo Dejus [13] u Republici Litvi utvrdilo je da su primarni uzroci teških i smrtonosnih nesreća neiskusno osoblje, nedovoljnih kvalifikacija i s nedostatkom svijesti o rizicima na gradilištima. Rahim et al. [14] proveli su istraživanje u Maleziji radi utvrđivanja čimbenika koji pridonose nesrećama na gradilištima i otkrili da su nesigurne prakse, koje uključuju pogrešne postupke i razine znanja te zanemarivanje protokola, istaknute kao najčešći uzroci nesreća na gradilištima. Visokogradnja jest složen proces koji uključuje više dionika, složeno inženjerstvo i jedinstvene izazove. Sigurnosni rizici su među najvažnijim problemima u tome kontekstu. Međutim, u prethodnim studijama nije bilo dovoljno istraživanja vezanih uz sigurnosne rizike u visokogradnji. Kako bi se ta praznina popunila, u sklopu ovog istraživanja proveden je sustavni pregled identifikacije, procjene i ublažavanja sigurnosnih rizika u visokogradnji.

2. Metodologija istraživanja

Metodologija istraživanja temeljila se na verifikaciji prethodnih studija o čimbenicima sigurnosnih rizika u građevinarstvu. Ovaj pregled literature sažima prethodne znanstvene članke iz područja sigurnosti povezanih s građevinskim aktivnostima u projektima visokogradnje.

Ovo je istraživanje identificiralo znanstvene članke objavljene između 2004. i 2024. (travanj) iz područja sigurnosti u kontekstu projekata visokogradnje ručnim pretraživanjem baza podataka radova *Web of Science*, *Science Direct* i *Scopus*. Niz za pretraživanje formuliran je kao ("sigurnost" ili "nesreća" u predmetnim pojmovima) i ("rizik" ILI "faktor" ili "izvedba" u predmetnim pojmovima) i ("visoka zgrada*") i ("izgradnja" ILI "gradilište" u predmetnim uvjetima). Odabrani radovi udovoljili su sljedećim kriterijima:



Slika 1. Plan istraživanja za pronalaženje istraživačkih radova

- bavili su se sigurnosnim čimbenicima koji pridonose nesrećama u projektima visokogradnje
- objavljeni su između 2004. i 2024.
- bili su dostupni na internetu
- napisani su na engleskome jeziku.

Na kraju su za potrebe istraživanja odabrana ukupno 84 znanstvena rada. Na slici 1. prikazan je plan istraživanja za pronalaženje istraživačkih radova.

U 3. poglavlju dan je pregled čimbenika sigurnosnih rizika identificiranih u industriji visokogradnje, uključujući osam glavnih, u 4. poglavlju opisana je metodologija primijenjena za procjenu i određivanje prioriteta tih čimbenika, u 5. poglavlju opisane su tehnike ublažavanja za osam glavnih čimbenika sigurnosnih rizika identificiranih u 3. poglavlju, a u 6. poglavlju prikazani su rezultati i rasprave.

3. Čimbenici sigurnosnih rizika

U ovome poglavlju kategorizirano je osam glavnih sigurnosnih čimbenika, uključujući otprilike 60 podčimbenika izdvojenih iz literature, kako bi se istražili uzroci nesreća na gradilištima.

3.1. Čimbenici privremene električne energije na gradilištu

Li et al. [4] proveli su istraživanje i otkrili znatnu latentnu opasnost povezanu s privremenom upotrebom električne energije na gradilištima. Zhang i sur. [15] istaknuli su da kao odgovor na sigurnosna pitanja privremene građevinske električne energije, zbog lošeg upravljanja građevinskih poduzeća, ne postoji poseban organizacijski plan za građevinsku električnu energiju ili plan ne pregledava jedinica nadležna za nadzor. To rezultira kontinuiranom skrivenom opasnošću vezanom uz privremenu

upotrebu električne energije na gradilištima, što može dovesti do velikih žrtava. U Ujedinjenome Kraljevstvu, prema [16], broj smrtnih slučajeva uzrokovanih dodiranjem sa strujom ili električnim pražnjenjima tijekom izgradnje iznosio je 11, što čini 23,9 % u cijeloj industriji od 2019. do 2023. Luo [17] je analizirao primarne razloge za nesreće uzrokovane udarom električne struje na licu mjesta, uključujući nedostatak znanja radnika i nezakonitu upotrebu električne energije. Čimbenici koji doprinose tome uključuju odsutnost zaštitnih mjera tijekom rada pod visokim naponom, odnosno radnici nose neodgovarajuću osobnu zaštitnu opremu (eng. *Personal protective equipment* - PPE) i neispravnu mehaničku i električnu opremu, tablica 1.

3.2. Čimbenici pada s visine

U području sigurnosti građenja znatno je težište na bavljenju stopama smrtnih slučajeva i ozljeda, posebno u projektima visokogradnje [18]. Hu et al. [19] utvrdili su da su među svim građevinskim nesrećama padovi s krovova ili visina znatan uzrok teških ozljeda (48 %) i smrtnih slučajeva (30 %). Najopasniji građevinski zadaci u projektima visokogradnje uključuju rad na krovovima ili na visini [20]. Nepravilna instalacija ili nedostatak sigurne zaštite od pada dva su ključna neposredna čimbenika koji dovode do nezgoda pri padu [21]. Dodatno, Manzoor [22] je otkrio da je pad s krova/visine identificiran kao najkritičniji sigurnosni čimbenik, a odmah ga slijedi osobna zaštitna oprema (2022.). HSE (*Health, Safety, and Environment*) je otkrio da je 40 smrtonosnih ozljeda uzrokovano padom s visine, što čini 30 % svih smrtnih slučajeva radnika u 2023., a 54 % svih smrtnih slučajeva uzrokovanih padom s visine bilo je zabilježeno u građevinskom sektoru [16]. HSE obuhvaća politike, postupke i prakse koje štite dobrobit radnika, štite okoliš i osiguravaju siguran rad. Čimbenik padova s krovova ili visine obuhvaća podčimbenike kao što su neadekvatne mjere zaštite rubova, nedostatak sposobnosti korisnika, kvar sustava sigurnosnih mreža i nepokriveni otvori u podu, tablica 2.

Tablica 1. Sigurnosni čimbenici privremene električne energije na gradilištu

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Radnikovo neznanje i nezakonito korištenje električne energije	[4, 17]
2	Nisu poduzete nikakve zaštitne mjere za izvanmrežne operacije pod visokim tlakom	[17]
3	Radnici nisu nosili odgovarajuću osobnu zaštitnu opremu	[17]
4	Mehanička i električna oprema je neispravna	[17]

Tablica 2. Čimbenici pada s visine

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Nedostatak sustava sigurnosne mreže	[17, 22]
2	Neadekvatne mjere zaštite rubova krova	[17, 22]
3	Kvar skele / rad na opasnoj skeli	[17, 22, 23]
4	Sudjelovanje u zadacima na povišenim mjestima ili u blizini otvorenih rubova bez primjene sustava za zaštitu od pada	[22]

Tablica 3. Sigurnosna inspekcija i sigurnosni znak upozorenja

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Nema dnevnih zapisa o sigurnosnim provjerama	[22, 17, 23, 4]
2	Nedostatak redovitih sastanaka o sigurnosti	[4, 17, 23, 27, 28, 29, 30, 31, 32]
3	Provjera nesreća bez utvrđivanja toga tko je bio uključen, kada su se dogodile ili zašto/kako su se dogodile	[4, 22]
4	Nepostavljanje potrebnih znakova	[22, 33]
5	Nema upadljivih znakova upozorenja	[22, 34]
6	Nedostatak sustava za nadgledanje radnika na gradilištu	[22, 35, 36]
7	Nema sustava za praćenje lokacije radnika	[22, 36, 37]
8	Nedostatak identifikacije potencijalnih sigurnosnih opasnosti	[22]
9	Nedostatak znaka za noćno svjetlo	[23]
10	Planovi lokacije bez sigurnosnih znakova na gradilištu	[22, 23]

Tablica 4. Osobna zaštitna oprema

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Nema nabave sigurnosne opreme	[41, 42, 43, 44]
2	Radnici koji ne nose osobnu zaštitnu opremu	[22, 38]
3	Nemar pri upotrebi zaštitnih naočala i zaštite za sluh	[45, 29, 22, 46, 47]
4	Nemar u korištenju sigurnosnih pojaseva pri radu na visini	[48, 49, 22]
5	Nemar pri nošenju sigurnosne kacige	[50, 22]

3.3. Sigurnosna inspekcija i čimbenici znakova upozorenja

Sigurnosne inspekcije smatraju se važnima za jamčenje sigurnosti radnika u građevinarstvu i uključuju svakodnevne sigurnosne provjere, redovite sigurnosne sastanke i detaljne istrage nesreća, što dovodi do identifikacije toga tko je bio uključen, kada su se dogodile te zašto/kako su se dogodile [24, 25].

Sigurnosni znakovi koji privlače pozornost imaju informirajuću i upozoravajuću ulogu koja utječe na sigurnost građenja. Sigurnosni znakovi važan su čimbenik u sprječavanju nezgoda tijekom izgradnje. Oni ne samo da upućuju na smjer, već i podsjećaju radnike na potencijalne opasnosti na gradilištima [26]. Nadalje, Manzoor et al. [22] naznačili su da sigurnosni znakovi sadržavaju podčimbenike kao što su nedostatak planova lokacije sigurnosnih znakova, neuspjeh u postavljanju potrebnih znakova, nepostojanje znakova upozorenja, nedostatak sustava za nadzor radnika na licu mjesta i nepostojanje sustava praćenja lokacije radnika, tablica 3.

3.4. Čimbenici osobne zaštitne opreme

Osobnu zaštitnu opremu najčešće spominju istraživači zaštite na radu u građevinarstvu. Privremeni rad tijekom građevinskih projekata glavni je uzrok nesreća koje rezultiraju teškim ozljedama i smrtnim slučajevima. Radnici koji nisu nosili osobnu zaštitnu opremu bili su sekundarni uzroci [38]. Čak i kada su

poslodavci osigurali osobnu zaštitnu opremu, stopa njihova korištenja bila je niska, osobito u vlažnim i opresivnim regijama. Zuofa et al. [39] otkrili su da se znatan broj građevinskih radnika suzdržava od korištenja osobne zaštitne opreme zbog osjećaja nelagodnosti. Štoviše, oprema se obično ne nosi ispravno. Zato je važno osigurati kvalificirani osobnu zaštitnu opremu i osigurati njegovu pravilnu upotrebu [40], tablica 4.

3.5. Čimbenici nesigurnog radnog okruženja

Na gradilištu su radnici izloženi opasnim situacijama. Nesigurno radno okruženje uključuje podčimbenike kao što su prašnjavi i bučni uvjeti, hladna ili vruća radna mjesta, radni uvjeti jakog vjetra i opasnosti od požara. Opasnost od požara u visokogradnji, koja može biti neuobičajena, također se treba smatrati najvećim sigurnosnim problemom jer dovodi do znatne štete [51]. Vremenski uvjeti u nekim zemljama kao što je Kina ljeti su vrući i sparni, a zimi jako hladni (u sjevernoj Kini). Teško je učinkovito raditi na gradilištima koja su tolerantna na loše uvjete radnog okruženja, tablica 5.

3.6. Osobni čimbenici i niske razine znanja i vještina radnika

Loše ponašanje radnika, motivacija, loše raspoloženje, nesvjesnost o osobnoj sigurnosti, osobna kompetentnost i nedostatak iskustva podčimbenici su osobnih čimbenika. Motivacija igra ključnu ulogu u povećanju produktivnosti

Tablica 5. Nesigurno radno okruženje

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Izloženost opasnoj situaciji	[37, 32, 4]
2	Opasnost od požara	[22, 17, 23]
3	Prašnjavo i bučno stanje	[22, 4]
4	Hladno ili vruće vrijeme	[4, 17, 22, 23]
5	Jako vjetrovito stanje	[4, 17, 22, 23]
6	Uvjeti zdravlja i sigurnosti na radu za radnike na gradilištu	[22, 35]

Tablica 6. Osobni čimbenici te niska razina znanja i vještina radnika

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Ljudska pogreška	[17, 22, 23]
2	Manjak svijesti o osobnoj sigurnosti	[22, 32, 41, 43, 44, 57, 58]
3	Nedostatak iskustva	[32]
4	Osobna kompetentnost	[41, 42, 44, 57]
5	Povećano radno opterećenje kao rezultat prepravljivanja, umora i prekovremenog rada	[4, 22, 32]
6	Loše raspoloženje	[59, 22]
7	Nedostatak sigurnosne edukacije i obuke radnika	[12, 27-32, 41-45, 58]
8	Pretjerano samopouzdanje radnika i sklonost prečacima	[22]
9	Nedovoljno znanje radnika o sigurnosti	[4]
10	Neodržavanje sastanaka s radnicima svakoga tjedna	[22]
11	Neadekvatna certificirana vještina rada	[22]
12	Nedovoljno tehničko vodstvo	[22]
13	Nerealno trajanje projekta i cijena naručitelja	[22]

građenja. Istraživanja su pokazala da zadovoljstvo poslom znatno utječe na stavove građevinskih radnika [52]. Zato je imperativ za menadžment dati prioritet povećanju razine zadovoljstva poslom među radnicima kako bi se poboljšala sigurnost na gradilištima [53]. Pritisak koji menadžment stvara na građevinske radnike također može utjecati na njihovo sigurnosno ponašanje [54].

Zbog teškog rada i loših radnih uvjeta u Kini malo mladih ljudi želi raditi taj posao. Rade ga samo stariji ljudi, što u građevinarstvu dovodi do čestih odljeva radnika. Kao rezultat toga iskusni i kvalificirani radnici nisu dostatni. Zato je prije početka rada neophodno da voditelj projekta provjeri znanje o sigurnosti i razine vještina građevinskih radnika kako bi formulirao odgovarajuće planove osposobljavanja za sigurnost [55, 56], tablica 6.

3.7. Čimbenici urušavanja oplata/dizalice, rušenja skele i preopterećenja

U visokogradnji događa se nekoliko vrsta nesreća urušavanja, uključujući urušavanje temeljne jame, skela, kranova i kolapse oplata [23]. Luo [17] je upozorio da je neispravan dizajn skele glavni razlog urušavanja oplata / rušenja skele. U fazi

projektiranja potrebno je izraditi posebno izvješće o provjeri nosivosti skele. Prije upotrebe potrebna je građevinska jedinica koja će prethodno opteretiti skelu kako bi se osigurala sigurnost. Xu [23] je usvojio metodu analize stabla pogrešaka (FTA) i istaknuo da su razlozi urušavanja skele/oplate također uključivali preopterećenje, netočnu montažu, nedostatke u kvaliteti i materijale ispod standarda. Što se tiče kolapsa dizalice, operateri dizalicom odgovorni su za učinkovitu kontrolu dizalice i pridržavanje sigurnosnih smjernica. Ako se specifikacije i rad dizalice ne poštuju ispravno, može doći do ozljeda i materijalne štete. Zaini et al. [61] izjavili su da su operativni i tehnički problemi glavni uzroci nesreća s dizalicama na gradilištima u Maleziji, tablica 7.

3.8. Čimbenici upravljanja sigurnošću

Čimbenici upravljanja sigurnošću sastoje se od sigurnosnih sustava odgovornosti za proizvodnju, sigurnosnih inspekcija, sigurnosnog obrazovanja i osposobljavanja, sprječavanja nesreća i liječenja, kontrole podizvođača, proračunske alokacije za upravljanje sigurnošću i odgovarajućeg nadzora. Xu et al. [23] naznačili su da je sustav odgovornosti za sigurnu proizvodnju srž pravila i propisa o sigurnoj proizvodnji. Sustav odgovornosti za

Tablica 7. Čimbenici urušavanja oplata/kvara skele i preopterećenja

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Neispravan dizajn skele	[17, 23]
2	Neobavljanje i inspekcija neizvještavanja prema potrebi	[4, 23]
3	Loša kvaliteta materijala korištenih skela	[22]
4	Skele su neadekvatno pričvršćene ili zategnute	[22]
5	Nekvalificirana i nemarna izrada pri postavljanju skela/oplata	[22]
6	Urušavanje dizalice	[22]
7	Urušavanje oplata	[17, 23]
8	Neispravno utovarivanje ili nepravilno postavljanje opreme/zaliha	[22, 17, 23]
9	Nekvalificirani rukovatelj dizalicom	[22, 17, 23]
10	Rukovanje opremom bez odgovarajućeg ovlaštenja	[22, 17, 23]
11	Neispravna upotreba opreme	[22, 17, 23]

Table 8. Čimbenici upravljanja sigurnošću

Br.	Čimbenici sigurnosnog rizika	Literatura
1	Ne postoji sigurnosni sustav odgovornosti za proizvodnju	[6]
2	Nedostatak posebnih planova izgradnje za opasne potprojekte	[6]
3	Kontrola podizvođača	[6, 25, 27, 37]
4	Nedostatak proračunskih izdvajanja za upravljanje sigurnošću	[12, 28, 29, 32]
5	Nema odgovarajućeg nadzora	[41, 43, 44, 57, 58]
6	Nema plana za hitne slučajeve	[6, 37, 60]
7	Nema posebnih uputa za postupke ugradnje i demontaže	[4, 17, 23]

sigurnu proizvodnju onaj je u kojemu su čelnici na svim razinama, funkcionalni odjeli, inženjersko i tehničko osoblje te operateri odgovorni za sigurnu proizvodnju na svim razinama tijekom proizvodnoga radnog procesa. Čak i ako je građevinska jedinica uspostavila sustav odgovornosti za sigurnost proizvodnje i sustav upravljanja sigurnošću, neki čelnici poduzeća stavljaju preveliko težište na upravljanje ekonomskim koristima, zanemarujući važnost rada na upravljanju sigurnošću, što rezultira neučinkovitim provedbom relevantnih zakona, pravila, propisa, normativa i planova. U tome slučaju zahtjevi iz propisa i planova ne mogu biti učinkovito provedeni [62]. Štoviše, radnicima u visokogradnji u Kini nedostaje dovoljno stručnosti i svijesti o sigurnosnim standardima i praksi. Zato su sigurnosno obrazovanje i obuka posebno važni, tablica 8.

4. Metode procjene razine sigurnosnog rizika

U 3. poglavlju čimbenici sigurnosnog rizika koje je identificirao autor sažeti su u osam glavnih čimbenika, što je prvi korak u rješavanju pitanja sigurnosti.

Učinkovito određivanje prioriteta rizika ne samo da pomaže menadžerima u poduzimanju radnji za smanjenje ili uklanjanje hitnih čimbenika rizika u sklopu sigurnosnih mjera, već omogućuje bolju raspodjelu ograničenih budžeta, smanjenje

troškova i oslobađanje resursa za daljnje ublažavanje rizika u projektima. Zato su u ovome poglavlju predložene učinkovite metode za procjenu 60 sigurnosnih rizika identificiranih u 3. poglavlju.

Procesi i procedure izgradnje sastoje se od brojnih zadataka, procesa i zahtjeva, uključujući brojne čimbenike i razmatranja u donošenju odluka. Sigurnost gradnje u projektima visokogradnje može se poboljšati primjenom sigurnosnih procjena na temelju analize odluka. Zato se metode višekriterijskih odluka (eng. *multicriteria decision-making* - MCDM) primjenjuju za procjenu sigurnosnih rizika kada donositelji odluka trebaju odabrati najbolju opciju među mnogim alternativama [63]. MCDM uključuje analitički hijerarhijski proces (eng. *analytic hierarchical process* - AHP), tehniku za izvođenje naloga po sličnosti s idealnim rješenjem (TOPSIS), VIKOR, najbolju-najgoru metodu (eng. *best-worst method* - BWM), laboratorij za ispitivanje i evaluaciju donošenja odluka (eng. *decision-making trial and evaluation laboratory* - DEMATEL) te teoriju neutvrđenih mjera (eng. *unascertained measure theory* - UMT). Prepoznavanje različitih MCDM tehnika i ocrtavanje njihovih prednosti i nedostataka ključno je za uspostavljanje robusnoga istraživačkog okvira [64]. Donositelji odluka mogu odabrati najprikladniju i najučinkovitiju metodu među MCDM-ovima za procjenu različitih vrsta rizika u visokogradnji. MCDM uključuje nekoliko koraka: zamjene,

kreiranje kriterija, opcije evaluacije, određivanje težine kriterija i metodu rangiranja [65].

Za rangiranje alternativnih planova rasporeda toranjskih dizalica u modularnoj integriranoj visokogradnji (eng. *modular integrated construction* - MiC) Zhang et al. predložili su novi okvir za donošenje odluka koji integrira MCDM tehnike, posebno fuzzy-AHP i TOPSIS. [89] za procjenu i rangiranje alternativnih planova rasporeda dizalica. TOPSIS je tehnika koja se temelji na konceptu da je najbolja alternativa MCDM problemu ona koja je najbliža njegovu idealnom rješenju. Sustav za podršku odlučivanju temeljen na znanju (eng. *knowledge-based decision support system* - KDSS) iskoristili su Rahman et al. [68] za pomoć pri odabiru krovnih materijala, pri čemu je metoda TOPSIS primijenjena tijekom procesa analize više kriterija i funkcionirala je kao komponenta mehanizma za zaključivanje unutar te tehnologije. Na temelju metode TOPSIS Li et al. [69] razvili su sustav procjene rizika od požara za rudnike ugljena.

Kako bi se povećala razina sigurnosti projekta, važno je odabrati izvođače na temelju različitih kriterija tijekom faze nadmetanja. Potrebna je metoda za generiranje kompromisnog rangiranja za skup alternativa na temelju njihove blizine idealnome rješenju. Zato su Liu i Yan [70] primjenjivali kombinirani AHP-VIKOR model za rješavanje postupka nadmetanja za građevinske projekte. Autori su ocjenjivali skupinu od četiriju kandidata na temelju pet kriterija izvedbe: ponude, konstrukcijskog dizajna, kompetentnosti tvrtke, kvalitete i vremenskog rasporeda. Nadalje, obje su metode primijenjene za izračun svojstvenog vektora prioriteta i određivanje konačnog rangiranja alternativa [63].

Odabir podizvođača ključan je za uspjeh projekta. Izvođači moraju uzeti u obzir mnoge aspekte podizvođača. Zato je DEMATEL, razvijen sedamdesetih godina prošlog stoljeća, posebno dizajniran za analizu i mapiranje uzročnih odnosa između čimbenika u složenome sustavu. To pomaže identificirati koji su čimbenici utjecajni i kako utječu jedni na druge. DEMATEL jest robusna metoda za prikupljanje kolektivnih uvida za stvaranje strukturnog modela. Učinkovito preslikava uzročne interakcije među složenim čimbenicima pomoću dijagrama uzrok-posljedica i matrice ovisnosti, kako su istaknuli Tzeng i Huang 2011. [71]. Bavafa et al. [85] upotrebljavali su DEMATEL za razvoj mrežne strukture za međuovisne faktore sigurnosnog programa. Njegovi su nalazi usklađeni s onima Hallowella i Gambatesea [72], koji su identificirali odabir podizvođača, uključenost zaposlenika i analize opasnosti na poslu kao ključne elemente učinkovitih sigurnosnih programa.

Da bi se odredili najveći sigurnosni rizici u visokim zgradama, Skibniewski et al. prvi su primijenili AHP u građevinarstvu [66], gdje su razradili prednosti te tehnike za tehničke i ekonomske procjene. Prikazana je studija slučaja koja demonstrira proces odabira toranjske dizalice kako bi se ilustrirala primjenjivost te metode. AHP sustav primjenjivali su Shapira et al. [67] za razvoj modela odabira opreme za građevinske projekte. Hijerarhija modela organizirana je podjelom problema na četiri glavna kriterija i osamnaest potkriterija, koji su analizirani iz

triju perspektiva: procjene troškova, procjene koristi i ukupne procjene. Model sadržava i kvantitativne i kvalitativne kriterije, no primarni problem AHP metode jest nedosljednost u uparenoj matrici usporedbe, što može rezultirati dvosmislenim ishodima. Štoviše, s povećanjem broja kriterija raste i zahtjev za usporedbama u paru, što predstavlja dodatni izazov. Kako bi riješili problem nedosljednosti u uparenoj matrici usporedbe u AHP-u, Rezaei et al. [73] predložili su BWM tehniku za smanjenje količine potrebnih uparenih usporedbi putem strukturiranih uparenih usporedbi, koje pomažu donositeljima odluka u donošenju dobro obrazloženih i logičnih odluka za rješavanje relevantnih čimbenika i kriterija u procesima donošenja odluka putem učinkovitog vaganja. Za razliku od Rezaeia [73], Nawaz et al. [74] primijenili su BWM za izravno rangiranje usluga u oblaku, pri čemu je korištena ljestvica od 1 do 9 za bilježenje preferencija stručnjaka za određivanje težine kriterija. Također je upotrijebio metodu najbolje-najgore (BWM) za procjenu isporučenog proizvoda i ocjenu učinka pružatelja usluga.

U građevinskoj industriji požarne nesreće u visokim zgradama često su kobne, kako tijekom izgradnje tako i u dovršenim građevinama. Kako bi procijenili veličinu rizika od požara, Li et al. [84] uspostavili su sustav indeksa procjene rizika od požara prikladan za visoke zgrade u izgradnji, u kojemu je teorija neutvrđenih mjera primijenjena za razvoj modela procjene rizika od požara za visoke zgrade u izgradnji. Proveli su studiju slučaja u Xi'anu u Kini i provjerili racionalnost i izvedivost sustava i modela procjene rizika od požara. Teoriju neutvrđene mjere prvi su predložili Wang et al. [75]. Za razliku od nasumičnih, sivih i nejasnih informacija, neutvrđene informacije označavaju situaciju u kojoj pojedinci u cijelosti ne razumiju precizne kvantitativne odnose ili stanja koja se razmatraju, što dovodi do subjektivne i kognitivne nesigurnosti u umovima donositelja odluka i evaluatora. Liu et al. [76] razvili su neutvrđenu matematičku teoriju i uveli model procjene koji se temelji na teoriji neutvrđene mjere. Taj model upotrebljava realne brojeve unutar raspona [0, 1] za učinkovito karakteriziranje neizvjesnih stanja ili dvosmislene prirode. Zato se teorija neodređenih mjera naširoko primjenjuje u mnogim područjima kao što su procjena kemijske sigurnosti [77], procjena ekološkog rizika [78], procjena rizika cjevovoda [75], procjena geotehničkog rizika [79, 80], procjena rizika u rudarstvu [81], procjena geološkog rizika [82] i društvena procjena [83]. Teorija neutvrđene mjere pruža učinkovit i kvantitativan pristup analizi različitih neizvjesnih čimbenika. Štoviše, ublažava nedostatke indeksa procjene rizika koji proizlaze iz nesigurnosti u čimbenicima utjecaja i ublažava probleme subjektivnosti u ishodima procjene rizika koji proizlaze iz bodovanja stručnjaka. Međutim, ta metoda ne može pružiti dinamički sustav indeksa procjene.

Za određivanje kritičnih čimbenika sigurnosti indeks relativne važnosti (eng. *relative importance index* - RII) je korišten za mjerenje relativnog značaja različitih čimbenika sigurnosti u kontekstu izgradnje. To pomaže kvantificirati važnost svakog čimbenika prema povratnim informacijama ispitanika. Potvrдна faktorska analiza (eng. *confirmatory factor analysis* - CFA)

Tablica 9. Metode procjene sigurnosnih rizika

Metode procjene	Definicija	Prednosti	Nedostaci	Literatura
Teorija neutvrđene mjere; metoda entropijske težine	Izraditi model procjene opasnosti od požara	Može učinkovito i kvantitativno analizirati različite neizvjesne čimbenike, ublažiti nepotpunost indeksa procjene rizika zbog nesigurnosti utjecajnih čimbenika i riješiti subjektivnost u rezultatima procjene rizika uzrokovanu bodovanjem stručnjaka.	Nema dinamičke procjene sustava indeksa.	[84]
Laboratorij za ispitivanje i ocjenjivanje za donošenje odluka (DEMATEL)	Uspostaviti mrežnu strukturu međuovisnih čimbenika programa sigurnosti. Uzročne interakcije među tim čimbenicima ilustrirane su dijagramom uzrok-posljedica i matricom ovisnosti	Olakšava učinkovitu identifikaciju svih uzročno-posljedičnih odnosa i ključnih čimbenika, čak i unutar vrlo složenih sustava.	Ne može se odrediti težina pojedinih kriterija; subjektivne prosudbe; krivo tumačenje rezultata	[85]
Indeks relativne važnosti (RII)	Rangiranje kritičnih čimbenika sigurnosti prema povratnim informacijama ispitanika primjenom RII vrijednosti.	Precizan je kao kvantitativna analiza koja primjenjuje jasno numeričko rangiranje čimbenika.	RII pretpostavlja da su svi čimbenici jednako važni, što ne mora uvijek odražavati stvarnost.	[86]
Najbolja-najgora metoda (BWM)	Bavi se utjecajnim čimbenicima i kriterijima u donošenju odluka za vaganje za prepoznavanje najvećih sigurnosnih rizika u visokim zgradama.	Rješava problem nedosljednosti u matrici uparenih usporedbi, što je veliki izazov u AHP metodi, i smanjuje broj uparenih usporedbi putem strukturiranih usporedbi po parovima.	Ovisnost o uzorku	[87]
Fuzzy višekriterijsko optimiranje i kompromisno rješenje (FUZZY VIKOR)	Vaganje i određivanje prioriteta utjecajnih čimbenika u sigurnosnim rizicima u visokogradnji	Robusna metoda za rješavanje višekriterijskih problema odlučivanja s proturječnim kriterijima koja se primjenjuje za određivanje prioriteta najvećih sigurnosnih rizika	Složenost; interpretacija fuzzy VIKOR rezultata može biti izazovna	[87, 88]
Fuzzy-AHP i TOPSIS	Ocjena i rangiranje planova rasporeda toranjskih dizalica u modularnoj integriranoj visokogradnji (MiC). TOPSIS se primjenjuje za procjenu i rangiranje alternativnih planova rasporeda toranjskih dizalica.	Fuzzy-AHP pretvara subjektivne percepcije stručnjaka u precizne numeričke vrijednosti, dok TOPSIS omogućuje jednostavan proces izračunavanja i daje praktičnije rezultate.	Projektanti se često suočavaju s izazovima pri istodobnom stvaranju alternativnih planova rasporeda i provođenju evaluacije izvedbe.	[89, 90, 91, 92]
Potvrдна faktorska analiza (CFA)	Za testiranje odgovaraju li podaci istraživanja hipotetskome modelu mjerenja	Provjeriti odgovaraju li predloženi teorijski modeli dobrom stvarnim podacima, čime se potvrđuje učinkovitost i pouzdanost teorije	CFA zahtijeva relativno veliku veličinu uzorka kako bi se osigurali točna procjena parametara modela i pouzdano zaključivanje.	[93]
FEAHP-PRAT metoda	Kombiniranje procesa <i>fuzzy</i> proširene analitičke hijerarhije (FEAHP) i tehnike proporcionalne procjene rizika (PRAT)	Sinergija između PRAT-a i MCDM-a osnažuje donositelje odluka da identificiraju učinkovite akcije za rješavanje sigurnosnih pitanja. Pomaže u određivanju prioriteta zaštitnih mjera i učinkovitome raspoređivanju resursa kako bi se maksimirala prevencija nesreća.	Potrebna je analiza osjetljivosti na težine koje su nametnute faktorima A i R tijekom izračunavanja CFP-a.	[92]
Mreža rizika od nezgoda u stambenoj izgradnji (RNHCA).	Model kvantitativne procjene koji identificira ključne čimbenike rizika i visokorizične lance unutar mreže rizika koja se razvija	Može identificirati visokorizične lance, procijeniti status sustava rizika i dinamički simulirati razvoj mreže faktora rizika.	Dobar dio izvješća o istrazi nesreća mora se prikupiti, klasificirati i analizirati kako bi se razumjeli obrasci i razvoj mreža rizika.	[94]

primjenjuje se za testiranje toga predstavlja li skup promatranih varijabli broj latentnih (neopaženih) čimbenika koje istraživač očekuje na temelju već postojeće teorije.

Proračun za zaštitu na radu u građevinskim projektima obično je mali. Kako bi se postigla maksimalna zaštita zdravlja i sigurnosti uz minimalne troškove, Koulinas et al. [92] predložili su proceduru procjene sigurnosnih rizika koja primjenjuje proces *fuzzy* proširene analitičke hijerarhije (FEAHP) za određivanje prioriteta rizicima na gradilištima. Također su kombinirali FEAHP s tehnikom proporcionalne procjene rizika (eng. *proportional risk assessment technique* - PRAT) kako bi identificirali učinkovite radnje za rješavanje sigurnosnih problema. AHP odražava iskustvo i vrijednosti donositelja odluka, dok PRAT upotrebljava povijesne podatke o nezgodama. Taj kombinirani proces pomaže donositeljima odluka u određivanju prioriteta među mjerama zaštite i optimiranju raspodjele resursa za maksimalnu prevenciju nesreća.

Kako bi identificirali kritične čimbenike rizika i visokorizične lance u razvoju mreže rizika, RNHCA je posebno dizajniran za analizu i upravljanje rizicima povezanim s nesrećama u projektima stambene izgradnje. Za razliku od tradicionalnih metoda procjene rizika koje mogu izolirati tretirati rizike, RNHCA se usmjerava na međuodnose između rizika definiranjem praga rizika za svaki čimbenik i dodjeljivanjem vrijednosti rizika na temelju korelacije između rizika čimbenika. Nadalje, dinamički simulira evoluciju mreže faktora rizika.

Za izravnije razumijevanje primjenjivosti i praktičnosti svake metode ocjenjivanja, u ovome poglavlju, u tablici 9. provedena je dubinska analiza prednosti i nedostataka pristupa, što će pomoći donositeljima odluka da odaberu najprikladniju metodu za procjenu sigurnosnog rizika građenja.

5. Tehnike ublažavanja sigurnosnih rizika

Cilj je ove studije smanjiti sigurnosne rizike na prihvatljivu razinu, a ne na najnižu razinu, poduzimanjem najekonomičnijih mjera. Zato se u ovome poglavlju istražuju rješenja za ublažavanje i uspostavlja okvir koji predstavlja strategije za ublažavanje glavnih sigurnosnih čimbenika rizika identificiranih u 3. poglavlju. U 4. poglavlju otkriveno je da je, prema dostupnoj literaturi, najkritičniji sigurnosni rizik pad s visine (eng. *falling from a height* - FFH) tijekom visokogradnje. Kao jedan od glavnih čimbenika rizika za sigurnost FFH se smatra najopasnijim zbog svojih čestih i kobnih posljedica [95-97], predstavlja ogromnu prijetnju životima građevinskih radnika, zbog čega je ključno primijeniti najbolje prakse tijekom faze projektiranja izgradnje. Kako bi riješili taj problem, Zhang et al. [98] razvili su 3D simulacijski model temeljen na BIM-u za prepoznavanje i sprječavanje opasnosti od pada tijekom faze planiranja izgradnje, koji je uspješno implementiran u dvije studije slučaja. Osobni sustav za zaustavljanje pada (eng. *personal fall arrest system* - PFAS) služi kao ključna sigurnosna mjera za radnike koji su izloženi riziku od pada tijekom svojih zadataka. Djeluje kao vrhunska zaštita, zaustavljajući padove osoba koje su u opasnosti tijekom rada

na visini. PFAS se sastoji od prikladne naprave za držanje tijela kao što su pojas, element koji apsorbira energiju pada, konop za sidrenje, točka za sidrenje, oprema za spajanje, karabinske kuke, žice za hvatanje i samouvlačne trake [99]. Pruža vitalni sloj zaštite za radnike na visini, čime se smanjuje rizik od ozljeda ili smrti u slučaju pada. Međutim, nedostatak je to što početno ulaganje u PFAS može biti znatno.

Sigurnost građevinskih radnika u projektima visokogradnje osigurana je upotrebom osobne zaštitne opreme. Međutim, velik problem proizlazi iz nemara radnika pri pravilnome nošenju osobne zaštitne opreme dok su na poslu. Kako bi se taj problem riješio, uveden je inovativni *cyber*-fizički sustav (CPS) za praćenje toga kako radnici nose osobnu zaštitnu opremu na gradilištima u stvarnome vremenu. Nadalje, Gómez-de-Gabriel et al. [100] predložili su senzorski sustav temeljen na *Bluetooth* niskoenergetskim (BLE) svjetionicima, a tehnika nosivih + BLE svjetionika uključuje integriranje inercijalnih senzora u pojas, koji može otkriti odsutnost kretanja kada radnik više ne nosi pojas. Srećom, cijena rješenja nije jako visoka, ali nedostatak mu je to što se mora integrirati s drugim računalnim tehnikama koje zahtijevaju profesionalnu obuku.

Što se tiče čimbenika upravljanja sigurnošću, moraju se poduzeti najučinkovitije sigurnosne mjere za razumnu kontrolu sigurnosnih rizika izgradnje. Zato je potrebno odabrati najučinkovitije i najekonomičnije mjere za određene rizike. Kao MCDM, TOPSIS se upotrebljavao za rangiranje sigurnosnih mjera na temelju njihovih učinaka smanjenja rizika. Naime, kako bi se identificirale najučinkovitije mjere [101], primijenjen je SPA za procjenu razina rizika prije i nakon ublažavanja na temelju teorije neizvjesnosti. Kako bi se pomoglo donositeljima odluka u formuliranju troškovno učinkovitih strategija kontrole rizika [102], analiza postavljenih parova (eng. *set pair analysis* - SPA) kombinira se s TOPSIS-om kako bi se rizici izgradnje kontrolirali na prihvatljivoj razini umjesto na pretjerano minimalnoj razini, tj. među kombinacijama sigurnosnih mjera koje mogu smanjiti rizike na prihvatljivu razinu, alternative koje zahtijevaju najmanje sigurnosnih mjera smatraju se optimalnim rješenjima. Međutim, ne uzima u obzir gubitke povezane s rizikom. Umjesto toga uzima u obzir samo broj sigurnosnih mjera kao *proxy* za troškove smanjenja rizika. Nadalje, pristup upravljanju sigurnošću temeljen na BIM-u, koji digitalno dizajnira i vizualizira uvjete na licu mjesta, uveo je [110], što može pomoći upraviteljima sigurnosti u razvoju učinkovitijih planova uz pomoć procesa automatiziranog prepoznavanja sigurnosnih rizika u tri koraka temeljenog na BIM-u.

Nesreće s dizalicama ne predstavljaju prijetnju samo građevinskim radnicima, već uzrokuju i štetu na obližnjim objektima, ugrožavajući pješake. U skladu s time dizalice se smatraju okosnicom visokogradnje. Kako bi se sigurnosni rizici dizalica sveli na najmanju moguću mjeru i kako bi se kvalitativno razvio generički model za sigurnost toranjskih dizalica, koji temeljito ocrtava razine sustava i uzročne putove čimbenika koji doprinose, Zhou et al. [104] razvili su generički model AcciMap, koji ne samo da pomaže u razumijevanju sigurnosnog

Tablica 10. Sažetak tehnika za ublažavanje sigurnosnih rizika

Tehnike ublažavanja	Primjene	Prednosti	Nedostaci	Literatura
Osobni sustav za zaštitu od pada (PFAS)	Uređaj dizajniran da prekine pad padajućeg radnika, služeći kao posljednja linija obrane za pojedince na pozicijama gdje su u opasnosti od pada.	Pružuje vitalni sloj zaštite za radnike na visini, smanjujući rizik od ozljeda ili smrti u slučaju pada.	Početna investicija u PFAS može biti znatna. Njegova primjena zahtijeva odgovarajuću obuku, što može biti dugotrajno i izazovno.	[99]
Metoda temeljena na TOPSIS-SPA	Definiranje postavljenog para, utvrđivanje stupnjeva povezanosti i procjena razine rizika. Idealno rješenje indeksa rizika i postavlja se kao rezultat rizika nakon ublažavanja, dok se antiidealno rješenje indeksa rizika j postavlja kao izvorni rezultat rizika bez ublažavanja.	Ta metoda uzima u obzir odnose <i>many-to-many</i> između sigurnosnih mjera i čimbenika rizika, pomažući donositeljima odluka da identificiraju najučinkovitije kombinacije sigurnosnih mjera.	Ne uzima u obzir gubitke povezane s rizikom. Umjesto toga koristi se brojem sigurnosnih mjera kao zamjenom za troškove smanjenja rizika.	[102]
AcciMap tehnika	Za sigurnost toranjskih dizalica na gradilištima	Pružuje pregled čimbenika koji doprinose i uzročnih tokova unutar sustava, omogućujući razvoj proaktivnog procesa upravljanja rizikom za sustavno formuliranje strategija za prevenciju i ublažavanje sigurnosnih rizika.	Zahtijeva veliku količinu podatkovne podrške i visoku stručnu osposobljenost osoblja.	[104]
BIM, GPS, GIS, RFID, AR VR, lasersko skeniranje i kodiranje za brzi odgovor (QR)	Generira širok raspon sveobuhvatnih podataka i informacija o projektu, s posebnim fokusom na povećanju razine sigurnosti gradilišta.	Metode računalnog vida imaju potencijal za rješavanje specifičnih problema tijekom izgradnje, uključujući praćenje napretka, poboljšanje učinkovitosti i analizu te praćenje zdravlja i sigurnosti.	Visoki troškovi, ograničena stručnost u BIM-u, nedostatne mogućnosti obuke, državni propisi, sigurnosni problemi, manjkave industrijske norme	[109]
BLE sustav (Bluetooth niske energije)	Sprječava pad pojedinaca s visine praćenjem pravilne upotrebe pojaseva.	Omogućuje jednostavno premještanje odašiljača i radi bez potrebe za kalibracijom, komunikacijskom infrastrukturom, podrškom za vanjsku obradu ili čestim ažuriranjima konfiguracije.	Nedostatak povratnih informacija radnicima u stvarnome vremenu zbog daljinskog nadzora. Radnici mogu prevariti sustav uklanjajući pojas dok ga drže pričvršćenim za uže za spašavanje.	[111, 112]
Dizajn temeljen na BIM-u za sigurnosno planiranje, upravljanje i sigurnosnu provjeru temeljenu na pravilima	Pristup sigurnosnome planiranju temeljen na BIM-u digitalnim projektiranjem i vizualizacijom uvjeta na lokaciji može pomoći upraviteljima sigurnosti u razvoju učinkovitijih planova. To uključuje automatizirani proces prepoznavanja sigurnosnih rizika u tri koraka temeljen na BIM-u.	Platforma za sigurnosno planiranje koja integrira automatizirani pristup sigurnosne provjere pomoću BIM-a. Te tehnologije povećavaju sposobnost radnika da prepoznaju opasnosti i učinkovito planiraju i upravljaju sigurnošću.	Te tehnologije još nisu adekvatno ispitane, potvrđene ili dokazane za industrijsku primjenu.	[110]
BIM integracija s oblakom, senzori, tehnologije praćenja u stvarnome vremenu	Tehnologija u oblaku, radiofrekvencijska identifikacija (RFID) i bežične senzorske mreže učinkovito su integrirane s BIM-om, potencijalno nudeći znatne prednosti za sigurnost gradnje.	BIM pruža novu komunikacijsku metodu koja olakšava protok informacija u oba smjera.	Jedan nedostatak BIM-a česta je potreba za ažuriranjem i nadogradnjom softvera svake tri godine, čime se povećava ukupni trošak početne implementacije tehnologije.	[36, 110]
Tijek BIM procesa	Nudi gotovo realno okruženje za sigurnosnu obuku građevinskih radnika i identifikaciju opasnosti na poslu (JHI).	Podrška obuci građevinskih radnika o sigurnosti i JHI-u tijekom faze prije izgradnje.	Promjena s konvencionalne metode sigurnosti konstrukcije i JHI-a na naprednu može zahtijevati znatna kapitalna ulaganja.	[99, 114]

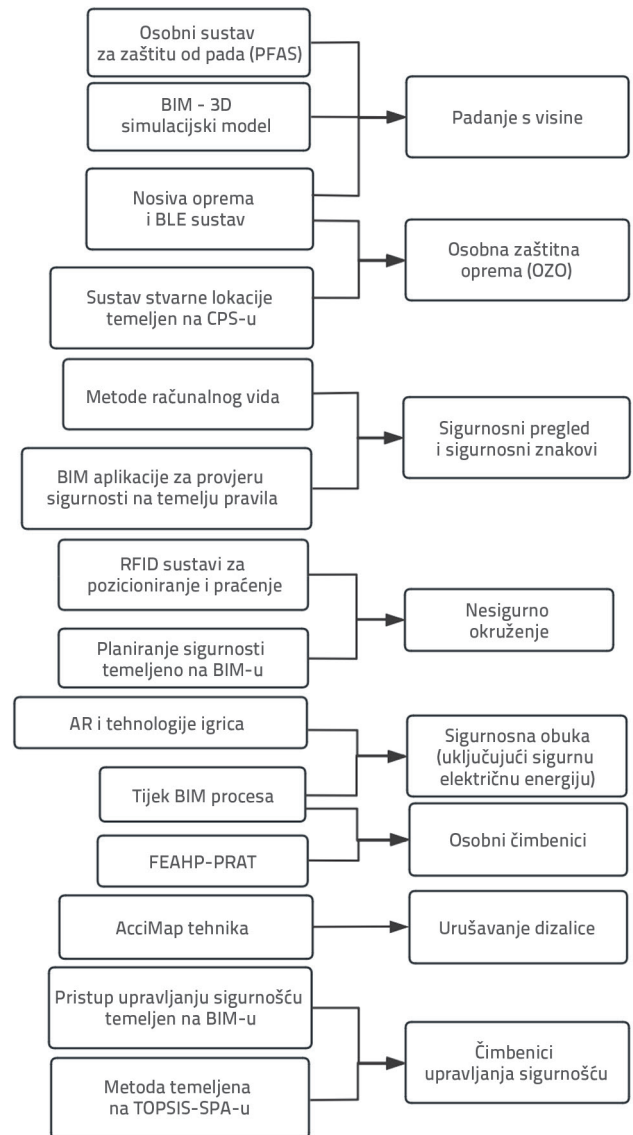
sustava toranjskih dizalica, već nudi i strukturirani okvir za sprječavanje i analizu nesreća toranjskih dizalica. Identificiranje ključnih čimbenika i ključnih dimenzija unutar sigurnosnog sustava toranjske dizalice može olakšati uspostavu sustava procjene i kontrole, čime se poboljšava cjelokupno upravljanje sigurnošću toranjske dizalice. Nedostatak tehnike AcciMap jest taj što zahtijeva veliku količinu podatkovne podrške i visoku stručnu osposobljenost osoblja. Slično tome, gradnja na dubokim temeljima riskantan je proces, no uz usklađenost s normama nadzor može procijeniti sigurnosne rizike prije nego što se nastavi. U BIM modelima sigurnost konstrukcije dubokih temelja može se učinkovito nadzirati primjenom usklađenosti norme temeljene na BIM-u.

Privremeni rad vodećije uzroka nesreća u projektima visokogradnje, koji često rezultira smrtnim slučajevima i ozljedama [115]. Kako bi stvorili sigurno radno okruženje, Azhar et al. [103] razvili su pet sigurnosnih planova, simulacija i videa temeljenih na BIM-u: 4D simulacije iskopavanja, planove zaštite od pada, planove sigurnosti električne energije, planove upravljanja dizalicom i planove za hitne slučajeve. Rezultati su potvrdili da je sigurnosno planiranje temeljeno na BIM-u umjereno do visokoučinkovito i točno za prepoznavanje opasnosti i priopćavanje sigurnosnih planova radnicima. Tehnologija radiofrekvencijske identifikacije (eng. *radiofrequency identification* - RFID) stekla je popularnost u raznim područjima. Njegova je najveća prednost velika brzina [115]. Cai et al. [105] predložili su kombinirani RFID i GPS sustav prilagođen gradilištima, ističući važnost točnih pokazatelja za procjenu pouzdanosti RFID-baziranih sustava za pozicioniranje i praćenje u kontekstu izgradnje. Abd Razak et al. [117] uveli su metodu dizajna za proizvodnju i montažu (eng. *design for manufacturing and assembly* - DfMA) kako bi smanjili privremeni rad na licu mjesta i ovisnost o stranoj nekvalificiranoj radnoj snazi, stvarajući tako sigurnije radno mjesto.

Sigurnosne inspekcije ključne su i moraju se pravilno provoditi kako bi se slučajne nesreće i stope smrtnosti svele na najmanju moguću mjeru. Međutim, inspekcije sigurnosti na gradilištima često su neučinkovite i samo formalne. Kao rezultat toga istraživači pokušavaju primjenjivati metode računalnog vida za istraživanje posebnih pitanja tijekom izgradnje kao što su praćenje napredovanja [106], poboljšanje učinkovitosti i analiza [107] te praćenje zdravlja i sigurnosti [108], što omogućuje prikupljanje i analizu digitalnih slika i izdvajanje visokodimenzionalnih podataka iz stvarnog svijeta za generiranje znanja, čime se poboljšava donošenje odluka u upravljanju. Manzoor et al. [109] integrirali su BIM s novim digitalnim tehnologijama kao što su GPS, GIS, RFID, AR, VR, lasersko skeniranje i kodiranje brzog odgovora (eng. *quick response* - QR) za potrebe nadzora i inspekcije. Autori su također razvili istraživački okvir koji integrira BIM s novim digitalnim tehnologijama za ublažavanje građevinskih nesreća, čime se uloga BIM-a proširuje novim digitalnim tehnologijama u upravljanju sigurnošću u izgradnji. Nadalje, [110] integrirao je BIM sa sigurnosnom provjerom temeljenom na pravilima i predložio automatiziranu metodu sigurnosne provjere koja primjenjuje BIM, što je poboljšalo

spособnost radnika da identificiraju opasnosti i učinkovito planiraju i upravljaju sigurnošću.

Na slici 2. prikazane su strategije ublažavanja za osam glavnih čimbenika sigurnosnih rizika identificiranih u 3. poglavlju.



Slika 2. Istraživački okvir za strategije ublažavanja osam glavnih sigurnosnih rizika identificiranih u 3. poglavlju

Za radnike s niskom razinom znanja i nedostatkom iskustva važni su sastanci o sigurnosti i dobro organizirana obuka o sigurnosti. [117] pokazali su da na produktivnost rada u građevinarstvu utječu čimbenici kao što su sigurnost gradilišta, jasnoća uputa i razmjena informacija na gradilištu. Ključno je obavijestiti radnike o mogućim sigurnosnim opasnostima tijekom faze prije izgradnje. [110] otkrio je da digitalne tehnologije u nastajanju poput BIM-a, VR-a, AR-a, GIS-a i tehnologija igara omogućuju stručnjacima sigurnosti virtualnu vizualizaciju i analizu gradilišta kako bi osmislili učinkovitu sigurnosnu obuku i proaktivne

sigurnosne mjere. Kombinacija FEAHP-a i PRAT-a (kao što je to spomenuto u 4. poglavlju) omogućuje donositeljima odluka da odrede učinkovite strategije za poboljšanje svijesti radnika o sigurnosti. To pomaže u određivanju prioriteta zaštitnih mjera i učinkovitome raspoređivanju resursa kako bi se poboljšali napori za sprječavanje nesreća. Također, [113] proveo je tijekom BIM procesa kako bi podržao gotovo realistično okruženje za sigurnosnu obuku i identifikaciju opasnosti na poslu za građevinske radnike. Time je uvedena inovativna komunikacijska metoda koja je poboljšala protok informacija u oba smjera.

Međutim, nedostaci uključuju velike troškove, ograničenu stručnost u BIM-u, nedovoljnu obuku, manjkave industrijske norme i nedostatak poticaja za integraciju BIM-a u građevinske pothvate. Što se tiče troškova sigurnosnih mjera, srednje i male tvrtke mogu razmotriti najkritičnije sigurnosne rizike i odabrati najekonomičnije i najpotrebnije tehnike kao što su sustav BLE i PFAS. Za velike građevinske tvrtke i one s višim sigurnosnim zahtjevima potrebni su BIM, oblaci, senzori, tehnologije praćenja u stvarnome vremenu, tijekom BIM procesa i identifikacija opasnosti na poslu (JHI) kako bi gradnja bila sigurnija.

U tablici 10. dan je detaljan pregled tehnika za smanjenje sigurnosnih rizika u cilju minimiziranja nezgoda u projektima visokogradnje.

6. Rasprava

Krajnji je cilj ovog istraživanja ponuditi izvedive mjere za ublažavanje sigurnosnih rizika na temelju identifikacije. Ovom opširnomo recenzijom ocijenjena su 84 znanstvena rada, i to 78 radova objavljenih u časopisima i šest s konferencija. Rezultat pokazuje da je identificirano osam glavnih sigurnosnih čimbenika i 60 podčimbenika te razvijeno devet metoda procjene za utvrđivanje utjecaja tih sigurnosnih čimbenika na gradilišta. Konačno, tehnike ublažavanja prilagođene za osam identificiranih glavnih sigurnosnih rizika dobivene su pomoću okvira prikazanog na slici 2.

Metode procjene sigurnosnih rizika uključuju MCDM i ne-MCDM metode. AHP, TOPSIS, VIKOR, BWM, DEMATEL, teorija neutvrđene mjere (UMT) i FEAHP–PRAT su među MCDM. Non-MCDM uključuje metode RII, CFA i mreže rizika za nesreće u stambenoj izgradnji (RNHCA). Kriteriji za odabir tih metoda navedeni su u tablici 9.

Tehnike ublažavanja uključuju AcciMap tehniku, pristup identifikacije opasnosti od pada temeljen na BIM-u, pristup upravljanju sigurnošću temeljen na BIM-u, osobni sustav za zaustavljanje pada, BLE sustav, tehniku videokamere, 4D integriranu tehniku temeljenu na BIM-u, cyber-fizički sustav (CPS), sustav lociranja u stvarnome vremenu temeljen na RFID-u i tehniku višekriterijskih odluka (MCDM). FEAHP–PRAT i TOPSIS–SPA su MCDM tehnike koje se primjenjuju za procjenu rizika i odabir prikladnih strategija za sigurnosne rizike. Kriteriji odabira za tehniku AcciMap temelje se na njezinoj sposobnosti da ilustrira kako uvjeti, odluke i akcije različitih aktera međusobno djeluju kako bi proizveli incident koji se analizira. Kriteriji odabira

za pristup prepoznavanju opasnosti od pada koji se temelji na BIM-u oslanjaju se na automatizirani okvir provjere pravila za prepoznavanje i ublažavanje opasnosti povezanih s padom. Kriterij odabira za pristup upravljanja sigurnošću temeljen na BIM-u jest može li nadzirati i prikazati položaje radnika u stvarnome vremenu i izdati pravodobna upozorenja rizičnim radnicima.

Danas građevinska industrija pruža osnovnu infrastrukturu i usluge potrebne za razvoj civilizacije, o kojoj ovisi život i rad ljudi [118]. Zato je važno smanjiti sigurnosne rizike i promovirati uspjeh projekta. Ovo istraživanje pruža vrijedne smjernice za voditelje građevinskih projekata, inženjere, službenike za sigurnost i dionike uključene u građevinske projekte, posebno visokogradnju. Ovaj okvir nudi praktičan način za ublažavanje sigurnosnih rizika koji pridonose nesrećama u projektima visokogradnje, čime se u konačnici povećava razina sigurnosti građevinskih projekata.

7. Zaključak

Cilj je ovog istraživanja identificirati i procijeniti sigurnosne rizike te pronaći tehnike ublažavanja kod projekata visokogradnje. U ovom se pregledu govori o istraživanju provedenome u razdoblju od 2004. do 2024. jer taj vremenski okvir odgovara razdoblju obilježene znatnim tehnološkim intervencijama u tradicionalnoj graditeljskoj praksi. Ovaj sveobuhvatni pregled sigurnosnih rizika u visokogradnji raspravlja o trenutačnim izazovima u usvajanju tehnologije za poboljšanje sigurnosnih scenarija izgradnje za buduća istraživanja. Rezultati pokazuju da su različite digitalne tehnike u nastajanju bile primjenjivane za znatno poboljšanje sigurnosti gradnje. Međutim, učinkovitost i pouzdanost tih digitalnih tehnologija ostaju uglavnom teorijske i čekaju praktičnu potvrdu u budućim istraživačkim nastojanjima. Nalazi ove studije pomoći će u daljnjemu istraživanju sigurnosnih rizika u visokogradnji.

Ovo je istraživanje karakteristično po tome što je: a) provelo sustavni pregled najnovijih dostignuća u sigurnosnim rizicima od nesreća i trenutačnim izazovima u usvajanju tehnologija za ublažavanje i b) nudi prijedloge i buduća usmjerenja koja nude smjernice o tome kako riješiti nedostatke trenutačnih preventivnih mjera za poboljšanje sigurnosti gradnje zgrada. Iz praktične perspektive nalazi ovog istraživanja pružit će vladama, građevinskim tvrtkama, inženjerima i istraživačima razumljiv okvir koji će im pomoći u shvaćanju najsuvremenijih tehnika i odabiru prikladnih tehnika za sebe. Ukratko, ovo istraživanje postiže cilj da gradilišta visokih zgrada učini sigurnijima i isplativijima.

Zahvala

Istraživači zahvaljuju malezijskome Ministarstvu visokog obrazovanja i Nacionalnome sveučilištu Malezije na prilici i financijskoj potpori pruženoj kroz *Fundamental Research Grant Scheme FRGS/1/2024/SSI12/UKM/02/3* u provođenju ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Department, S.R.: GDP Share of the construction industry value in China from 2018 to 2021, <https://www.statista.com/statistics/1283570/china-construction-industry-s-share-of-gdp/>, [2.12.2021.]
- [2] Green, B.: The real face of construction 2020, The Chartered Institute of Building, Berkshire, UK, 2020.
- [3] International Labor Office: Construction: A hazardous work, International Labor Organization, Geneva, 2015.
- [4] Yadi, L., Ning, Y., Chen, W.T.: Critical success factors for safety management of high-rise building construction projects in China, *Advances in Civil Engineering*, (2018), pp. 1-5
- [5] Bureau of Labor Statistics: Fatal occupational injuries by industry and event or exposure, All United States, 2022.
- [6] Ministry of Housing and Urban-Rural Development: Statistics on the number of construction accidents and deaths in China, 2023.
- [7] Shima, F., Kasa, A., 2022, Stability Analysis on Tower Crane Foundation Using Finite Element Method, *Jurnal Kejuruteraan SI*, 5 (2022) 2, pp. 199-206, [https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-si5\(2\)-21](https://doi.org/10.17576/jkukm-2022-si5(2)-21)
- [8] Ministry of Housing and Urban-Rural Development: Uniform standard for civil building design, <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB50352-2019>, [2.12.2021.]
- [9] Mondarres, M., Kaminky, M., Krivtsov, V.: Reliability engineering and risk analysis quality and reliability, New York, 1999.
- [10] Zaini, A.A.: Exploring the construction safety risk drivers and risk prevention, *Journal of Engineering & Applied Sciences*, 12 (2018) 8, pp. 1952-1957
- [11] Lubega, H., Kiggundu, B.M., Tindiwensi, D.: An investigation into the causes of accident in the construction industry in Uganda, <http://buildnet.csir.co.za/cdcproc/dpcs/2nd/lubegah.pdf> Accessed on October 2011, [2.12.2021.]
- [12] Tam, C.M., Zeng, S.X., Deng, Z.M.: Identifying elements of poor construction safety management in China, *Safety science*, 42 (2004) 7, pp. 569-586
- [13] Dejus, T.: Accidents on construction sites and their reasons, www.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/MBM_2007/2pdf/Dejus.pdf, [2.12.2021.]
- [14] Rahim, A., Hamid, A., Zaimi, M., Majid, A., Singh, B.: Causes of accidents at construction sites, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 20 (2008) 2, pp. 242-259
- [15] Hua, Z.: Study on construction safety risk management of high-rise housing construction engineering, Master's thesis, Anhui Jianzhu University, 2021.
- [16] HSE: Health and safety in construction sector in Great Britain, 2023., <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg150.htm>, [2.12.2021.]
- [17] Dong, L.: Research and application of safety evaluation system of building construction scheme, Chongqing University, 2006.
- [18] Gillen, M.: The NIOSH construction program: Research to practice, impact, and developing a National Construction Agenda, *J. Safety Res.*, 41 (2010), pp. 289-299
- [19] Hu, K., Rahmandad, H., Smith-Jackson, T., Winchester, W.: Factors influencing the risk of falls in the construction industry: A review of the evidence, *Constr. Manag. Econ.*, 29 (2011) 4, pp. 397-416
- [20] O'Donnell, K.: Review of the campaign to prevent falls in construction, *Front. Public Heal.*, (2017) 5, pp. 1-4, <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00275>.
- [21] Beavers, J.E., Moore, J.R., Schriver, W.R.: Steel erection fatalities in the construction industry, *J. Constr. Eng. Manag.*, 135 (2009) 3, pp. 227-234
- [22] Manzoor, B., Othman, I., Waheed, A.: Accidental safety factors and prevention techniques for high-rise building projects – A review, *Ain Shams Engineering Journal*, 13 (2022) 5, p. 101746
- [23] Xu, R.R.: Research on construction safety risk evaluation of high-rise buildings, PhD dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing, 2013.
- [24] Singapore Standard Online: Factories (Building Operations and Work of Engineering Construction) Regulations, 2001.
- [25] Razuri, C., Alarcón, L.F., Diethelm, S.: Evaluating the effectiveness of safety management practices and strategies in construction projects, *Proceedings of the 15th Conference of the IGLC*, 2007, pp. 271-281
- [26] Talab, A.D., Meshkani, M., Mofidi, A., Mollakazemiha, M.: Evaluation of the perception of workplace safety signs and effective factors, *Int. J. Occup. Hyg.*, (2013) 5, pp. 117-122
- [27] Hinze, J., Hallowell, M., Baud, K.: Construction-safety best practices and relationships to safety performance, *Journal of construction engineering and management*, 139 (2013) 10, pp. 04013006
- [28] Cheng, E.W., Li, H., Fang, D.P.: Construction safety management: An exploratory study from China, *Construction Innovation*, 4 (2004) 4, pp. 229-241
- [29] Fang, D.P., Huang, X.Y., Li, H.: Factor analysis-based studies on construction workplace safety management in China, *International Journal of Project Management*, 22 (2004) 1, pp. 43-49
- [30] Cheng, E.W., Ryan, N., Kelly, S.: Exploring the perceived influence of safety management practices on project performance in the construction industry, *Safety science*, 50 (2012) 2, pp. 363-369
- [31] Lee, C.K., Jaafar, Y.: Prioritization of factors influencing safety performance on construction sites: A study based on grade seven (G7) main contractors' perspectives, *International Proceedings of Economics Development and Research*, 57 (2012), p.
- [32] Yew, W.C., Sia, M.K., Janet, O.Q.: Safety risks analysis: Moderating effect of risk level on mitigation measures using PLS-SEM technique, *Sustainability*, 15 (2023) 2, p. 1090
- [33] Hong Ling, G., Yantao, Y., Weisheng, Z., Yan, L.: BIM and safety rules based automated identification of unsafe design factors in construction, *Procedia Eng.*, 164 (2016), pp. 697-672, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.669>.
- [34] Zamanian, Z., Afshin, A., Davoudiantalab, A.H., Hashemi, H.: Comprehension of workplace safety signs: A case study in Shiraz industrial park, *J. Occup. Heal. Epidemiol.*, 2 (2013) 1, pp. 60-66
- [35] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China: Standard of construction safety inspection (JGJ59-2011), <http://www.nmgjsw.gov.cn/upload/519761c1-fb3f-643e-a612-5b51f65b6592/201511/20151149465361796.pdf>, [2.12.2021.]
- [36] Ganah, A., John, G.A.: Integrating building information modeling and health and safety for onsite construction, *Safe Health Work*, 6 (2015) 1, pp. 62-68, <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.10.002>.
- [37] Singapore Standard: Code of practice for safety management system for construction worksites (CP79:1999), <https://www.singaporestandardseshop.sg/Product/Product.aspx?ID=62dfaf6c-ae5e-66b7-8861-aba7df8c6aab>, [2.12.2021.]

- [38] Izudi, J., Ninsiima, V., Alege, J.B.: Use of personal protective equipment among building construction workers in Kampala, Uganda, *J. Environ. Public Health*, (2017), pp. 1–5, <https://doi.org/10.1155/2017/7953589>.
- [39] Zuofa fa, T., Ochieng, E.G., Awuzie, B.O.: Stakeholder perception of risks and risk factors in infrastructural projects: The case of the Niger Delta, *Proceedings of the West Africa Built Environment Research (WABER) Conference*, 24 (2012), pp. 1465–1476
- [40] Barro-Torres, S., Fernández-Caramés, T.M., Pérez-Iglesias, H.J., Escudero, C.J.: Real-time personal protective equipment monitoring system, *Computer Communications*, 36 (2012) 1, pp. 42–50
- [41] Memon, Z.A., Khatri, K.L., Memon, A.B.: Identifying the critical factors affecting safety program performance for construction projects within Pakistan construction industry, *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 32 (2013) 2, pp. 269–276
- [42] Khan, K.M.I., Suguna, K., Raghunath, P.N.: A study on safety management in construction projects, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 4 (2015) 4, pp. 119–128
- [43] Langford, D., Rowlinson, S., Sawacha, E.: Safety behaviour and safety management: its influence on the attitudes of workers in the UK construction industry, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7 (2000) 2, pp. 133–140
- [44] Aksorn, T., Hadikusumo, B.H.: Critical success factors influencing safety program performance in Thai construction projects, *Safety science*, 46 (2008) 4, pp. 709–727
- [45] Charehzehi, A., Ahankoob, A.: Enhancement of safety performance at construction site, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 5 (2012) 1, p. 303
- [46] Nath, N.D., Behzadan, A.H., Paal, S.G.: Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment, *Autom. Constr.*, 112 (2020), p. 105385, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.105385>.
- [47] Wong, T.K.M., Man, S.S., Chan, A.H.S.: Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers, *Saf. Sci.*, 149 (2020), p. 106963, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.106963>.
- [48] Hassanein, A.A.G., Hanna, R.S.: Safety programmes in the Egyptian construction industry, *Int. J. Inj. Contr. Saf. Promot.*, 14 (2007) 4, pp. 481–487
- [49] Wong, F.K.W., Chan, A.P.C., Yam, M.C.H., Wong, E.Y.S., Tse, K.T.C., Yip, K.K.C.: Construction safety in Hong Kong: Accidents related to fall of person from height, 2004.
- [50] Yustiarini, D.: Safety and health study of construction workers to improve work productivity, *Atlantis Press*, (2019) 2, pp. 698–670, [doi:https://doi.org/10.5291/ictvet-18.2019.107](https://doi.org/10.5291/ictvet-18.2019.107).
- [51] Mousavi, S., Bagchi, A., Kodur, V.K.R.: Review of post-earthquake fire hazard to building structures, *Can. J. Civ. Eng.*, 35 (2008) 7, pp. 689–98, [doi:https://doi.org/10.1139/L08-029](https://doi.org/10.1139/L08-029).
- [52] Garzón, I.R., Martínez-Fiestas, M., Alonso, M.L.: The perceived risk by the construction worker: What role does the trade play?, *J. Constr.*, (2020) 12, pp. 86–93
- [53] Stoilkovska, B.B., Žiléska Pančovska, V., Mijoski, G.: Relationship of safety climate perceptions and job satisfaction among employees in the construction industry: The moderating role of age, *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, 21 (2015) 4, pp. 440–444
- [54] Goh, Y.M., Love, P.E.D., Stagbouer, G., Annesley, C.: Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach, *Accid. Anal. Prev.*, 48 (2012), pp. 118–25
- [55] Xin, C., Zhou, L.: Online routing of hazardous materials transportation based on risk equity, *Proceedings of the 8th Int. Conf. Serv. Syst. Serv. Manag. - Proc. ICSSSM*, 2011., pp. 2–4, <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2011.5959522>.
- [56] Winge, S., Albrechtsen, E., Mostue, B.A.: Causal factors and connections in construction accidents, *Saf. Sci.*, 120 (2019), pp. 130–41, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.015>.
- [57] Chen, W.T., Lu, C.S., Liu, S.S., Wang, M.S.: Measuring the perception of safety among Taiwan construction managers, *Journal of civil engineering and management*, 19 (2013) 1, pp. 37–48
- [58] Haadir, S., Panuwatwanich, K.: Critical success factors for safety program implementation among construction companies in Saudi Arabia, *Procedia engineering*, 14 (2011), pp. 148–155
- [59] Japan Construction Occupational Safety and Health Association (JCOSHA): Construction Occupational Health and Safety Management System (COHSMS) Guidelines & COHSMS External System Evaluation, 2007., <http://docplayer.net/17164657-Construction-occupational-health-and-safetymanagement-system-cohsms-guidelines-cohsms-externalsystem-evaluation-external-audit-by-jcosh.html>, [2.12.2021.]
- [60] Othman, I., Majid, R., Mohamad, H., Shafiq, N., Napiah, M., Raza, U., Mustafa, M., et al.: Variety of accident causes in construction industry, *Proceedings of the MATEC Web Conf.*, 2018., <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820532006>.
- [61] Zaini, N., Muhamad, Z. et al.: Crane accidents at construction sites in Malaysia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 498 (2020) 1.
- [62] Haifeng, X.: Research on safety management of construction projects, Beijing Jianzhu University, 2019.
- [63] Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., Canteras-Jordana, J.C.: A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, *Automation in construction*, 45 (2014), pp. 151–162
- [64] Guo, S., He, J., Li, J., Tang, B.: Exploring the impact of unsafe behaviors on building construction accidents using a Bayesian network, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17 (2020), p. 221
- [65] Opricovic, S.: Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning, *Expert Syst. Appl.*, 38 (2011) pp. 12983–12990
- [66] Skibniewski, M.J., Chao, L.C.: Evaluation of advanced construction technology with AHP method, *Journal of construction engineering and management*, 118 (1992) 3, pp. 577–593
- [67] Shapira, A., Goldenberg, M.: AHP-based equipment selection model for construction projects, *Journal of construction engineering and management*, 131 (2005) 12, pp. 1263–1273
- [68] Rahman, S., Odeyinka, H., Perera, S., Bi, Y.: Product-cost modelling approach for the development of a decision support system for optimal roofing material selection, *Expert Systems with Applications*, 39 (2012) 8, pp. 6857–6871
- [69] Li, X.X., Wang, K.S., Liu, L.W., Xin, J., Yang, H.R., Gao, C.Y.: Application of the entropy weight and topsis method in safety evaluation of coal mines, *Procedia Engineering*, 26 (2011), pp. 2085–2091
- [70] Liu, H., Yan, T.: Bidding-evaluation of construction projects based on VIKOR method, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2007., pp. 1778–1782
- [71] Tzeng, G.H., Huang, J.J.: Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications (1st ed.), Chapman and Hall/CRC, <https://doi.org/10.1201/b11032>
- [72] Hallowell, M., Gambatese, J.: A formal model of construction safety risk management, *Proceedings of the Construction and Building Research Conference (COBRA)*, 2007. pp. 6–7

- [73] Rezaei, J., Nispeling, T., Sarkis, J., Tavasszy, L.: A supplier selection life cycle approach integrating traditional and environmental criteria using the best worst method, *Journal of cleaner production*, 135 (2016), pp. 577–588
- [74] Nawaz, F., Asadabadi, M.R., Janjua, N.K., Hussain, O.K., Chang, E., Saber, M.: An MCDM method for cloud service selection using a Markov chain and the best-worst method, *Knowledge-Based Systems*, 159 (2018), pp. 120–131
- [75] Wang, G.Y.: Uncertainty information and its mathematical treatment, *Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute*, 23 (1990) 4, pp. 1–8
- [76] Liu, K.D., Pang, Y.J., Sun, G.Y., Yao, L.G.: The unascertained measurement evaluation on a city's environmental quality, *Systems Engineering Theory and Practice*, 12 (1999), pp. 52–58
- [77] Wei, D., Jiang, J.C., Ni, L., Shen, S.L., Fu, G.: Uncertainty measurement theory based evaluation of inherent safety of chemical process, *China Safety Science Journal*, 28 (2018) 5, pp. 117–122
- [78] Peng, X.L., Guo, S.H.: Research on ecological risk assessment and prevention mechanism in mining areas based on unascertained measures theory, *Forestry Economics*, 40 (2018) 8, pp. 92–97
- [79] Gong, F.Q., Li, X.B., Dong, L.J., Liu, X.L.: Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory, *Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering*, 27 (2008) 2; pp. 323–330
- [80] Li, S.C., Wu, J., Xu, Z.H., Li, L.P.: Unascertained measure model of water and mud inrush risk evaluation in karst tunnels and its engineering application, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (2017) 4, pp. 1170–1182
- [81] Zeng, J.L., Huang, R., Guan, Y.H., Cheng, J., Song, G.C.: Research on application of entropy-unascertained measure theory in tailing pond safety standardization, *Journal of Safety Science and Technology*, (2014) 2, pp. 160–166
- [82] Wu, Q., Zhao, D., Wang, Y., Shen, J., Mu, W., Liu, H.: Method for assessing coal-floor water-inrush risk based on the variable-weight model and unascertained measure theory, *Hydrogeology Journal*, 25 (2017) 10, pp. 1–15
- [83] Li, Y.C., Yang, J., Shi, H.W., Li, Y.J.: Assessment of sustainable urban transport development based on entropy and unascertained measure, *PLOS ONE*, 12 (2017) 10, p. e0186893
- [84] Li, W., et al.: Fire risk assessment of high-rise buildings under construction based on unascertained measure theory, *PLOS ONE*, 15 (2020) 9, p. e0239166
- [85] Bavafa, A., Mahdiyar, A., Marsono, A.K.: Identifying and assessing the critical factors for effective implementation of safety programs in construction projects, *Safety Science*, 106 (2018), pp. 47–56, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.025>
- [86] Manzoor, B., Othman, I., Manzoor, M.: Evaluating the critical safety factors causing accidents in high-rise building projects, *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (2021) 3, pp. 2485–2492, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.11.025>
- [87] Ansari, R., Dehghani, P., Mahdikhani, M., et al.: A novel safety risk assessment based on fuzzy set theory and decision methods in high-rise buildings, *Buildings*, 12 (2022) 12, p. 212
- [88] Mohandes, S.R., Sadeghi, H., Mahdiyar, A., Durdyev, S., Banaitis, A., Yahya, K., Ismail, S.: Assessing construction laborers' safety level: A fuzzy MCDM approach, *J. Civ. Eng. Manag.*, 26 (2020), pp. 175–188
- [89] Zhang, Z., Pan, W.: Multi-criteria decision analysis for tower crane layout planning in high-rise modular integrated construction, *Automation in Construction*, 127 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103709>
- [90] Taylan, O., Bafail, A.O., Abdulaal, R.M., Kabli, M.R.: Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies, *Appl. Soft Comput.* 17 (2014), pp. 1105–116
- [91] Ardeshir, A., Mohajeri, M.: Assessment of safety culture among job positions in high-rise construction: A hybrid fuzzy multicriteria decision-making (FMCDM) approach, *Int. J. Inj. Control. Saf. Promot.*, 25 (2018), pp. 195–206
- [92] Koulinas, G.K., Marhavilas, P.K., Demesouka, O.E., et al.: Risk analysis and assessment in the worksites using the fuzzy-analytical hierarchy process and a quantitative technique—A case study for the Greek construction sector, *J. Safety science*, 112 (2019), pp. 96–104
- [93] Li, Q., Ji, C., Yuan, J., Han, R.: Developing dimensions and key indicators for the safety climate within China's construction teams: A questionnaire survey on construction sites in Nanjing, *Safety Science*, 93 (2017), pp. 266–276, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.11.006>
- [94] Cheng, L., Cao, D.: Evolution model and quantitative assessment of risk network in housing construction accidents, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31 (2024) 1, pp. 227–246, <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2022-0446>
- [95] Zhang, M., Fang, D.: A cognitive analysis of why Chinese scaffolders do not use safety harnesses in construction, *Construction Management and Economics*, 31 (2013) 3, pp. 207–222
- [96] Nadhim, E.A., Hon, C., Xia, B., Stewart, I., Fang, D.: Falls from height in the construction industry: a critical review of the scientific literature, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13 (2016) 7, p. 638
- [97] Dong, X.S., Largay, J.A., Choi, S.D., Wang, X., Cain, C.T., Romano, N.: Fatal falls and PFAS use in the construction industry: Findings from the NIOSH FACE 11 reports, *Accid. Anal. Prev.*, 102 (2017), pp. 136–43
- [98] Zhang, Sijie, et al.: BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning, *Safety science*, 72 (2015), pp. 31–45
- [99] Rafindadi, A.D., Shafiq, N., Othman, I.: A Conceptual Framework for BIM Process Flow to Mitigate the Causes of Fall-Related Accidents at the Design Stage, *Sustainability*, 14 (2022) 20, <https://doi.org/10.3390/su142013025>
- [100] Gómez-de-Gabriel, J.M., Fernández-Madrugal, J.A., López-Arquillos, A., Rubio-Romero, J.C.: Monitoring harness use in construction with BLE beacons, *Measurement*, 131 (2019), pp. 329–340
- [101] Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., et al.: A state-of-the-art survey of TOPSIS applications, *Expert Systems with Applications*, 39 (2012) 17, pp. 13051–13069, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- [102] Zhang, Q., Guo, H., Liao, P.C., Fang, D., Fu, M.: Optimizing safety-measure combinations to address construction risks, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 28 (2022) 2, pp. 941–957
- [103] Azhar, S., Behringer, A.: A BIM-based approach for communicating and implementing a construction site safety plan, *Proceedings of the 49th ASC Annual International Conference*, 2013.
- [104] Wei, Z.W., Zhao, T., Liu, W., Tang, J.: Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective, *Saf. Sci.*, 109 (2018), pp. 95–108, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.001>
- [105] Cai, H., Andoh, A.R., Su, X., Li, S.: A boundary condition based algorithm for locating construction site objects using RFID and GPS, *Adv. Eng. Inform.*, 28 (2014), pp. 455–468

- [106] Han, K.K., Golparvar-Fard, M.: Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs, *Autom. Constr.*, 53 (2015), pp. 44-57
- [107] Gong, J., Caldas, C.H.: Computer vision-based video interpretation model for automated productivity analysis of construction operations, *J. Comput. Civ. Eng.*, 24 (2010), pp. 252-263
- [108] Fang, Q., Li, H., Luo, X., Ding, L., Luo, H., Li, C.: Computer vision aided inspection on falling prevention measures for steeplejacks in an aerial environment, *Autom. Constr.*, 93 (2018), pp. 148-164
- [109] Manzoor, B., Othman, I., Pomares, J.C., Chong, H.Y.: A research framework of mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating Building Information Modeling with emerging digital technologies, *Appl. Sci.*, (2021) 11, p. 8359
- [110] Afzal, M., Shafiq, M.T., Al Jassmi, H.: Improving construction safety with virtual-design construction technologies - A review, *Journal of Information Technology in Construction*, 2 (2021), pp. 319-340, <https://doi.org/10.36680/jitcon.2021.018>
- [111] Teizer, J., Vela, P.A.: Personnel tracking on construction sites using video cameras, *Adv. Eng. Informat.*, 23 (2009) 4, pp. 452-62, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.06.011>.
- [112] Rey-Merchán, M.D.C., Gómez-de-Gabriel, J.M., Fernández-Madrigal, J.A., López-Arquillos, A.: Improving the prevention of fall from height on construction sites through the combination of technologies, *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, 28 (2020), pp. 590-599
- [113] Park, C.S., Kim, H.J.: A framework for construction safety management and visualization system, *Autom. Constr.*, 33 (2013), pp. 95-103
- [114] Rubio-Romero, J.C., Rubio, M.C., García-Hernández, C.: Analysis of construction equipment safety in temporary work at height, *J. Constr. Eng. Manag.*, 139 (2013), pp. 9-14, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000567).
- [115] Rafique, M.Z., Haider, M., Raheem, A., Ab Rahman, M.N., Amjad, M.S.: Essential Elements for Radio Frequency Identification (RFID) adoption for Industry 4.0 Smart Manufacturing in Context of Technology-Organization-Environment (TOE) Framework - A Review, *Jurnal Kejuruteraan*, 34 (2022) 1, pp. 1-10.
- [116] Abd Razak, M.I., Khoiry, M.A., Badaruzzaman, W.H.W., Hussain, A.H., Zain, M.Z.M.: Pembangunan Kerangka Pelaksanaan Prinsip Rekabentuk Untuk Pembuatan Dan Pemasangan Ke Arah Pembinaan Secara Digital dan Mampan di Malaysia, *Jurnal Kejuruteraan*, 35 (2023) 2, pp. 351-360.
- [117] Nurhendi, R.N., Khoiry, M.A., Hamzah, N.: Conceptual framework factors affecting construction labour productivity, *Jurnal Kejuruteraan*, 34 (2022) 1, pp. 89-99.
- [118] Hatem, Z.M., Kassem, M.A., Ali, K.N., Khoiry, M.A.: A new perspective on the relationship between the construction industry performance and the economy outcome-A literature review, *Jurnal Kejuruter*, 34 (2022), pp. 191-200.