

Primljen / Received: 02.04.2021.  
Ispravljen / Corrected: 25.5.2021.  
Prihvaćen / Accepted: 24.6.2021.  
Dostupno online / Available online: 10.8.2021.

# Otkazivanje mostova, forenzičko inženjerstvo i preporuke za projektiranje robusnih konstrukcija

## Autori:



Ivana Milić, mag.ing.aedif.  
Trames d.o.o.  
[ivana.milic211@gmail.com](mailto:ivana.milic211@gmail.com)



Prof.dr.sc. Ana Mandić Ivanković, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[ana.mandic.ivankovic@grad.unizg.hr](mailto:ana.mandic.ivankovic@grad.unizg.hr)



Dr.sc. Anton Syrkov, dipl.ing.građ.  
Transmost PLC, Rusija  
[syrkov\\_av@transmost.ru](mailto:syrkov_av@transmost.ru)



Dr.sc. Dominik Skokandić, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[dominik.skokandic@grad.unizg.hr](mailto:dominik.skokandic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju

Pregledni rad

[Ivana Milić, Ana Mandić Ivanković, Anton Syrkov, Dominik Skokandić](#)

## Otkazivanje mostova, forenzičko inženjerstvo i preporuke za projektiranje robusnih konstrukcija

U radu je dan pregled forenzičkog inženjerstva u građevinarstvu, strategije koja slijedi nakon otkazivanja mostova. Provedena je statistička analiza i sistematizacija raspoloživih podataka o otkazivanjima mostova u cijelom svijetu u vremenskom razdoblju od 1966.-2020. godine. Detaljno je analizirano više od 600 slučajeva djelomičnog ili potpunog rušenja mostova te su analizirani uzroci koji su doveli do njihovog otkazivanja. Do otkazivanja svakog od ovih mostova najčešće nije došlo uslijed samo jednog faktora, već je glavni uzrok je najčešće okidač u uzročnopsljedičnom slijedu niza događaja koji su tome pridonijeli. Sukladno tome, osim glavnih uzroka, za svaki od analiziranih slučajeva naveden je i utjecaj ljudskog faktora kao preduvjeta koji je doveo do otkazivanja. U drugom dijelu rada opisani su tipovi progresivnog kolapsa kao kritičnog načina otkazivanja konstrukcija, s naglaskom na mostove, kao i pregled teorije robusnosti konstrukcija. Dane su smjernice i pristupi projektiranju u cilju sprječavanja katastrofalnih otkazivanja i stvaranja robusnijih konstrukcija. Opisani su načini postizanja robusnosti kod projektiranja novih te ojačavanja postojećih mostova, uz praktične primjere iz prakse.

### Ključne riječi:

forenzičko inženjerstvo, otkazivanje mostova, progresivni kolaps, robusnost, izvanredna djelovanja

Subject review

[Ivana Milić, Ana Mandić Ivanković, Anton Syrkov, Dominik Skokandić](#)

## Bridge failures, forensic structural engineering and recommendations for design of robust structures

A review of forensic structural engineering, which is a strategy that follows after bridge failure, is presented in the paper. A detailed statistical analysis, and worldwide systematisation of available bridge failure data for the 1966-2020 period, are given. More than six hundred cases of partial or full collapse of bridges are analysed in detail, and causes that have led to their failure are examined. Failure of each of these bridges was in most cases not caused by a single factor, i.e. the main cause was most often just a trigger in the cause-and-effect sequence of events that contributed to such failure. Consequently, in addition to main causes, the influence of human factor, as a precondition leading to failure, is considered in each of the analysed cases. Types of progressive collapse, being a critical structural failure mechanism, are described in the second part of the paper, with an emphasis on bridges. An overview of the theory of structural robustness is also given. Design guidelines and approaches, aimed at preventing catastrophic failure and creating more robust structures, are presented. Methods for achieving robustness in the design of new bridges and in the strengthening of the existing ones are also described, and practical real-life examples are provided.

### Key words:

forensic engineering, bridge failure, progressive collapse, robustness, extreme actions

## 1. Uvod

Mostovi su složeni konstrukcijski sustavi čije projektiranje i izgradnja zahtijeva visoku razinu stručnosti, znanja i iskustva. Proces projektiranja, izvedbe i održavanja mostova u Hrvatskoj definiran je skupom pravilnika i normi čija uspješna i pravilna primjena osigurava trajnost i sigurnost mostova za vrijeme projektiranog životnog vijeka. Zbog njihovog dugotrajnog uporabnog vijeka i velike važnosti u prometnoj infrastrukturalnoj mreži, a kao posljedica urbanizacije i porasta broja stanovnika, zahtjevi za nove, ali i već izgrađene mostove neprestano se povećavaju. Dolazi do promjena okolnosti u kojima je most projektiran, izgrađen i otvoren za promet, mijenjaju se uvjeti i utjecaji okoliša, rastu potrebe društva (težina i volumen prometa), ali i inženjerski apetiti. Unatoč zavidnoj razini inženjerskog znanja, velikog iskustva, kontinuiranom razvijanju novih spoznaja i usvajanjima modernih tehnologija, implementaciji novih normi i propisa - svjedoci smo otkazivanja mostova diljem svijeta s katastrofalnim posljedicama.

Otkazivanja mostova sa sobom donose mnogobrojna pitanja vezana za tehničke i/ili pravne pokazatelje te zahtijevaju preuzimanje odgovornosti za prouzročenu štetu. Primijenjena tehnička znanost koja se bavi otkrivanjem uzroka otkazivanja konstrukcija jest *forenzičko inženjerstvo u građevinarstvu*.

U ovom radu je opisana strategija forenzičkog inženjerstva u građevinarstvu, analizirani su glavni uzroci i ljudski faktori koji su pridonijeli otkazivanju prema dostupnim podacima o otkazivanju mostova, te se daje pregled tipova progresivnog otkazivanja konstrukcija i kritički osvrt na projektiranje robusnijih građevina.

## 2. Forenzičko inženjerstvo

### 2.1. Pregled

Forenzičko inženjerstvo je multidisciplinarno područje koje se primjenjuje u mnogim tehničkim granama. Prema NAFE (National Academy of Forensic Engineers), udruženju forenzičkih inženjera svih tehničkih područja iz SAD-a: *Forenzičko inženjerstvo je primjena umjetnosti i znanosti o inženjerstvu u pitanjima koja su ili mogu biti povezana s pravosudnim sustavom, uključujući alternativno rješavanje sporova* [1]. ASCE (American Society of Civil Engineers) daje nešto širu definiciju: *Forenzičko inženjerstvo je primjena inženjerskih principa na istragu otkazivanja ili drugih problema s izvedbom. Forenzičko inženjerstvo također uključuje svjedočenje o rezultatima tih istraga pred sudom* [2]. Slično, prema [3]: *Forenzičko inženjerstvo može se klasificirati kao tehnička disciplina ili preciznije kao primijenjena tehnička znanost gdje je glavni fokus na istraživanju uzroka, tijeka i posljedica negativnih tehničkih pojava u različitim područjima*.

U Europi za sada nema udruženja koje okuplja inženjere čiji je zadatak praktična primjena forenzičkog inženjerstva u građevinarstvu. Međutim, međunarodno udruženje građevinskih inženjera IABSE (*International Association For Bridges And Structural Engineering*) osnovalo je 2011. godine radnu skupinu pod nazivom

*Forensic Structural Engineering*, čiji je cilj unaprjeđenje i praktična primjena forenzičkog inženjerstva u građevinarstvu. U sklopu aktivnosti radne skupine napravljen je pregled praktične primjene forenzičkog inženjerstva u nekolicini europskih država [4]. Ovim pregledom zaključeno je kako u većini zemalja (s iznimkom UK-a) u Europi ne postoje službena udruženja forenzičkih inženjera, kao ni definirane zakonske norme u procesu otkrivanja uzroka otkazivanja konstrukcija. Međutim, u svim zemljama postoje osnovne smjernice za inženjere koji se bave ovom granom, no nisu zakonski propisane. Također, zaključeno je kako se profesionalna odgovornost inženjera zaduženog za projektiranje i izvedbu mosta uvelike razlikuje od države do države. Važno je naglasiti da je ovim pregledom obuhvaćena samo nekolicina država, te da podaci o otkazivanju mostova i njihove posljedice nisu bili dani na uvid radnoj skupini.

Sveobuhvatno, forenzičko inženjerstvo je interdisciplinarno područje znanosti koje se bavi istraživanjem tehničkih nezakonitosti i njihovim pravnim aspektima, s obzirom na to da građevinski inženjeri rade u promjenjivim okruženjima s mnogo nepoznanica i nesigurnosti. Građevinarstvo je, zbog složenog postupka projektiranja i izgradnje, dugotrajnog uporabnog vijeka tijekom koje građevine dotrajavaju, potrebe za velikim brojem različitih stručnjaka u pojedinim fazama projekta te promjenjivostima koje su sastavni dio cijelog procesa, podložno utjecajima raznih tehničkih nepravilnosti koje mogu imati ozbiljne posljedice.

Tijekom projektiranja, građenja i uporabe građevina postoji niz pojava koje ne mogu biti definirane s apsolutnom sigurnošću. Inženjer nastoji projektirati takvu konstrukciju koja će u predviđenom uporabnom vremenu moći odoljeti svim predviđenim opterećenjima i djelovanjima s određenim sigurnosnim zalihama. Eksplicitno slijedi da se projektiranje konstrukcija zasniva na inženjerstvu pouzdanosti, pri čemu trenutno aktivni propisi i norme daju mjerodavni tehnički okvir za projektiranje. Prema [5]: *Sve dok konstrukcije i proizvode projektiraju, grade i proizvode ljudi koristeći nesavršene materijale i postupke, događat će se otkazivanja zajedno s uspjesima*.

Razlog za istraživanje otkazivanja građevina može biti dvostran, usmjeren na sigurnost, poboljšanje sustava i sprječavanje sličnih događaja s jedne strane te na pronalaženje odgovornosti za otkazivanje s druge strane [6]. U mnogim državama smjernice za provođenje forenzičke istrage ne postoje [6], a primjeri strategija forenzičkog inženjerstva u nekim državama se mogu pronaći u [7-9].

Iako je proces forenzičkog inženjerstva reverzibilan projektiranju konstrukcija jer inženjeri imaju pred sobom izgrađenu konstrukciju, forenzički inženjer treba poznavati norme, propise i postupak projektiranja konstrukcija, tehnologiju njihove izgradnje, razumjeti ponašanje konstrukcija u uporabi te moći predvidjeti stanja i događaje koji su potencijalno mogli dovesti do otkazivanja. Norme za projektiranje pružaju polaznu osnovu za zahtjeve projektiranja koji su bili na snazi u vrijeme projektiranja konstrukcije, te predstavljaju minimalnu razinu izvedbe koju je konstrukcija koja je otkazala trebala ispuniti [10]. Forenzički

inženjer uz tehničke kompetencije mora posjedovati dobre komunikacijske i analitičke vještine, društvenu i profesionalnu odgovornost. Forenzički inženjer mora razmišljati detektivski - imati oko za detalje pri analizi dostupnih podataka, objektivno tražiti istinu te promišljati kritički izvan okvira. Zahtijevane kompetencije forenzičkog inženjera su prikazane na slici 1. no ove kvalitete moraju se očekivati i od svih inženjera uključenih u proces građenja i održavanja.



Slika 1. Kompetencije inženjera

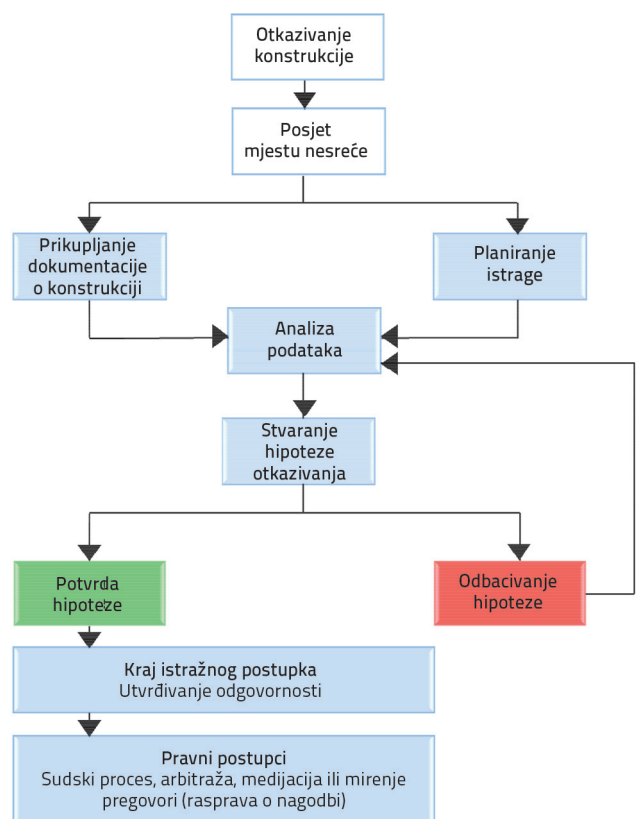
Dođe li do velikih materijalnih šteta i/ili ljudskih gubitaka, često se odgovornost za otkazivanje i naplata proizašlih šteta svih oštećenih strana traži pravim putem, pri čemu forenzički inženjeri mogu imati ulogu sudskog vještaka u razjašnjavanju tehničkih aspekata slučaja u proceduralnim pravnim slučajevima. Dakle, forenzički inženjer u ulozi sudskog vještaka mora uz posjedovanje znanja iz tehničkih aspekata slučaja, poznavati pravne aspekte i procedure, iako forenzički inženjer nije sudski vještak sve dok ga sud ili neki drugi forum za rješavanje sporova formalno ne priznaju [11]. Prema ASCE, *Code of Ethics* [12]: *Inženjeri trebaju pustiti u opticaj javno izvješće samo na objektivni i istinit način, a inženjeri, kada služe kao sudski vještaci, trebaju izraziti inženjersko mišljenje samo kada se temelji na odgovarajućem poznavanju činjenica, na temelju tehničke osposobljenosti i na temelju iskrenog uvjerenja. Sudska praksa u Sjedinjenim Državama ne zahtijeva da mišljenje vještaka bude apsolutno sigurno; oni zahtijevaju samo razumnu razinu inženjerske sigurnosti* [10] te tzv. *Standard of care* koji nije ono što je inženjer trebao učiniti po nečijem mišljenju ili ono što drugi kažu da bi napravili, ili što bi po nečijem mišljenju inženjer napravio sada, nego ono što bi kompetentni inženjeri stvarno učinili u to vrijeme da su radili u sličnim okolnostima.

## 2.2. Forenzičko inženjerstvo

Forenzički inženjeri rade u različitim okruženjima, ali proces njihove istrage uvijek slijedi logičan slijed radnji. Sam proces počinje prikupljanjem informacija, njihovom obradom i interpretacijom pri postavljanju hipoteza otkazivanja,

provođenjem inženjerskih analiza i potvrđivanjem hipoteze uzroka otkazivanja konstrukcije. Nakon toga, slijedi utvrđivanje pravne, profesionalne i moralne odgovornosti koje može rezultirati pravnim postupcima. Sveobuhvatni princip forenzičkog inženjerstva od trenutka netom nakon nesreće do pravnih postupaka i utvrđivanja odgovornosti može se opisati na način prikazan dijagramom na slici 2.

Prvi koraci nakon otkazivanja konstrukcije uključuju osiguranje područja istraživanja i krizno upravljanje. Poželjno je da forenzički inženjer bude uključen u slučaj od samog početka kako bi mogao netom nakon otkazivanja posjetiti mjesto nesreće i napraviti preliminarni vizualni pregled. Tada je potrebno što više fotografirati i dokumentirati oštećenja, te uzeti uzorke za ispitivanje koji bi kasnije mogli biti od ključne važnosti.



Slika 2. Shematski prikaz strategije forenzičkog inženjerstva

Preliminarni razgovor sa svjedocima dobro je obaviti što prije dok su sjećanja još svježija. Pri tome treba provjeriti imaju li slike i/ili snimke neposredno prije ili za vrijeme otkazivanja, pitati ih o stanju koje je vladalo netom prije otkazivanja, načinu i redoslijedu otkazivanja te jesu li možda primijetili nešto neuobičajeno. Na temelju prvih saznanja s terena može se dati preliminarna procjena i okvir za daljnje postupanje u istrazi. Uz prikupljanje potencijalnih dokaza na terenu, potrebno je prikupiti i svu postojeću (dostupnu) dokumentaciju o konstrukciji, kao što je projektna dokumentacija, ugovorna dokumentacija i dokumentacija naknadnih intervencija ako postoji. Bitan faktor

su i izvješća o održavanju konstrukcije, izvješća o pregledima, ispitivanjima materijala, odnosno dokumentacija kontrole i osiguranja kvalitete ugrađenog materijala.

Norme i pravilnici koji su bili aktualni u vrijeme projektiranja su od ključne važnosti jer su mjerodavni za utvrđivanje odgovornosti. Nezanemariv faktor su i zapisi o vremenu, odnosno djelovanjima na konstrukciju, dokumentirana oštećenja ili neka izvanredna događanja koja je konstrukcija pretrpjela.

Planiranje istrage obuhvaća određivanje njenog opsega, stvaranje kompetentnog istražnog tima, određivanje ciljeva te određivanje naknada za usluge. Opseg istrage može varirati s obzirom na količinu nastale štete u pogledu ljudskih ili materijalnih gubitaka.

Analiza svih podataka je ključan dio postupka. Od iznimne je važnosti da stručni ljudi budu ti koji će uzeti u obzir sve poznate okolnosti nesreće i pokušati ih spojiti u pripadajući uzročnopsljedični slijed. U ovom koraku identificiraju se i analiziraju prikupljeni dokazi, provode ispitivanja (terenska i/ili laboratorijska) i proračuni (statički i/ili dinamički).

Rezultati analize svih prikupljenih podataka te dodatni proračuni i/ili ispitivanja trebali bi rezultirati definicijom hipoteze otkazivanja. U ovom koraku presudnu ulogu može imati mogućnost dobivanja što više različitih mišljenja, interdisciplinarnost u istraživanju i analizi, analitičke vještine te kritičko razmišljanje svih uključenih stručnjaka, koje bi trebalo dovesti do objektivnosti prosudbe. Nakon toga slijedi revizija hipoteze i plana istrage, uzimanje u obzir svih činjenica, provjera da nije promaknuo neki bitan detalj, razrada i objašnjenje zaključaka istrage. Utvrdi li se tada neki propust, odnosno zanemarivanje činjenica koje bi mogle utjecati na uzročnopsljedični slijed otkazivanja, istraga se vraća na analizu podataka. Ako se ništa takvo ne pronađe, slijedi potvrda hipoteze otkazivanja i pisanje završnog izvještaja o uzroku otkazivanja te utvrđenom načinu i redoslijedu događaja koji su do otkazivanja doveli.

U nekim slučajevima može doći do pravnih procesa, gdje forenzički inženjer ima ulogu sudskog vještaka. Cilj pravnih procesa je utvrđivanje profesionalne i moralne odgovornosti, odgovarajuće kazne za odgovorne aktere ako ih ima i naknade šteta prouzročenih nesrećom svim oštećenim stranama. Nakon kraja istražnog postupka i pisanog izvještaja može uslijediti jedan od ovih procesa: sudski proces, arbitražna, medijacija ili mirenje (posredovanje) ili pregovori (rasprava o nagodbi) [13].

Opseg istrage treba biti definiran toliko široko koliko je potrebno da obuhvati sve stvarne i/ili moguće odnosno potencijalne uvjete koji su mogli biti vezani za nesreću. Ako posljedice otkazivanja nisu velike, forenzičko inženjerstvo može biti manjeg opsega, ovisno o trenutku umiješanosti forenzičkog inženjera u slučaj, o razmjerima oštećenja, materijalnoj i financijskoj šteti, ljudskim gubitcima, raspoloživom vremenu i novcu za sva potrebna istraživanja.

Forenzička istraga može se provesti i ako ne dođe do potpunog otkazivanja konstrukcije, odnosno može se provoditi i samo parcijalno na pojedinim dijelovima konstrukcije za veće ili manje štete/otkazivanja ili zbog utvrđivanja spornog stanja.

Uzrok otkazivanja konstrukcija ne mora nužno biti samo jedan faktor, pa stoga u daljnjem razvoju forenzičkog inženjerstva interdisciplinarnost postaje sve važnija.

Zaključno, forenzičko inženjerstvo u građevinarstvu može se klasificirati kao primijenjena tehnička znanost odnosno grana inženjerstva koja za cilj ima određivanje uzročnopsljedičnog slijeda pri otkazivanju konstrukcija, njenih dijelova ili identificiranjem stanja konstrukcija koja nisu predviđena pri projektiranju, te postavljanjem tehničke osnove za postupke utvrđivanja pravne odgovornosti i daljnje odluke (arbitražna, meditacija ili mirenje, sudski procesi, nagodba itd. - slika 2.).

### 3. Otkazivanja mostova

#### 3.1. Uvod

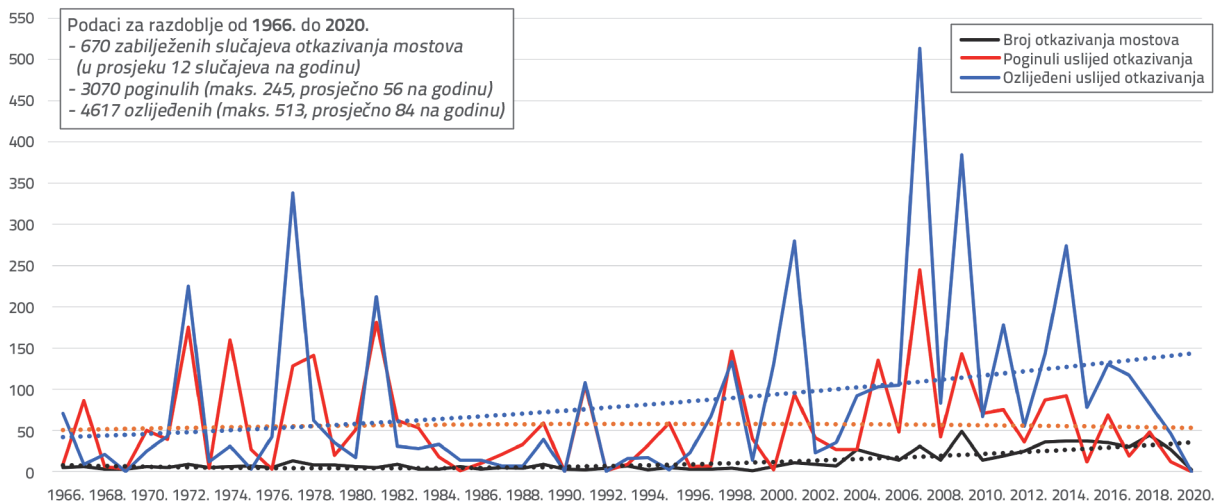
Otkazivanje konstrukcija može se definirati kao [10]: nesukladnost s projektiranim očekivanjima ili neprihvatljiva razlika između namjeravane i stvarne izvedbe. Očigledno da se u ovu definiciju mogu uklopiti jedva vidljiva manja oštećenja konstrukcija ali i katastrofalna otkazivanja. Međutim, veličina oštećenja ili otkazivanja često nije presudna za važnost lekcija koje iz njihove analize mogu proizaći.

Otkazivanja s najviše ljudskih gubitaka, velikim materijalnim štetama i općenito ona najvećega opsega najduže se pamte. Jedno od njih, prouzročeno kao posljedica pogrešaka pri projektiranju bilo je otkazivanje mosta Quebec 1907. godine, kad je poginulo 75 radnika koji su u tom trenutku radili na njegovoj izgradnji. Dopuštena naprezanja su bila veća od onih koja su u to vrijeme smatrana uobičajenima u praksi, a proračun vlastite težine nije revidiran nakon što je povećan raspon mosta, što je rezultiralo da je pri proračunu uzeta manja vrijednost od stvarne [14].

Iako su koncepti projektiranja i izgradnje dosegli zavidnu razinu, otkazivanja konstrukcija se događaju širom svijeta unatoč novim tehnologijama i inovacijama modernog doba kojem svjedočimo. Više od stoljeća poslije, 2018. godine, tijekom izgradnje došlo je do otkazivanja pješačkog mosta u Miamiju, dok je ispod njega promet neometano tekao, što je prouzročilo šest smrtnih slučajeva, a prema [15], razlog otkazivanja su također bile pogreške u projektiranju.

Izvijanje te preveliki progibi dijelova rešetkaste konstrukcije [14] kod mosta Quebec, kao i pukotine [15] na pješačkom mostu u Miamiju, obje pojave uočene danima prije otkazivanja bile su očit znak upozorenja da nešto nije u redu. Međutim, gradnja se nije zaustavila (dok se uzrok takvih okolnosti ne razjasni) te je došlo do otkazivanja sa smrtnim posljedicama.

Otkazivanje koje je nedavno šokiralo svijet bila je rušenje dijela mosta Morandi u Genovi. Genovski most izgrađen je i pušten u promet 1967. godine, a u 90-im godinama izveden je projekt sanacije i ojačavanja, te su postavljeni senzori koji su omogućili 24-satno praćenje ponašanja mosta uslijed prometnog djelovanja. Unatoč svemu, za vrijeme jake oluje u kolovozu 2018., jedan je od ovješanih raspona otkazao



Slika 3. Statistička analiza dostupne IABSE baze podataka o otkazivanju mostova i izravnim posljedicama (temeljeno na [18])

bez prethodne najave te prouzročio smrt više od 40 osoba [16]. Uzrok otkazivanja još uvijek nije utvrđen. Preliminarna istraživanja upućuju na loše projektiranje, upitnu praksu izgradnje i nezadovoljavajuće održavanje, ili njihovu kombinaciju kao moguće uzroke otkazivanja, a kao potencijalno mogući okidač ne treba zanemariti ni snažnu oluju koja je pogodila grad u vrijeme otkazivanja [17].

Dokumentiranje svih vrsta otkazivanja konstrukcija, njihova analiza i lekcije koje iz njih mogu proizaći bitni su kako se slični događaji ne bi ponavljali u budućnosti. Uzroci otkazivanja se mogu pronaći u fazi projektiranja, izgradnje ili uporabe mosta te mogu biti raznoliki. Statistička analiza može pomoći pri identificiranju glavnih uzroka otkazivanja mostova i usmjeriti pozornost upraviteljima mostova na okolnosti koje mogu biti kritične za pojedini tip mosta. Na osnovi takvih saznanja te uspješne edukacije, upravitelji mostova i inženjeri zaduženi za njihovo održavanje mogli bi pravodobno reagirati i spriječiti ponavljanje katastrofa kao u Miamiu [14].

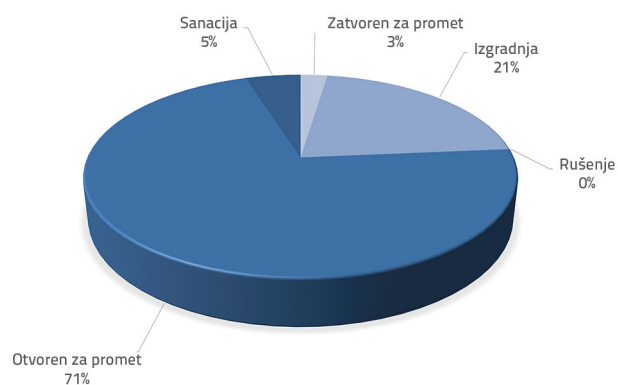
Analitička obrada podataka, sistematizacija i statistička analiza otkazivanja mostova u ovom je radu napravljena na temelju 670 primjera otkazivanja koji su se dogodili u cijelom svijetu u periodu od 1966. do 2020. godine. Podaci o tim mostovima prikupljeni su u sklopu aktivnosti radne skupine TG1.5 *Performance-Based Design Founded on Lessons from Bridge Failures* međunarodnog udruženja (IABSE), te su ustupljeni autorima na daljnju sistematizaciju i analize.

Baza podataka sadrži popis mostova, njihovu lokaciju, namjenu, godinu te fazu uporabnog vijeka u kojoj je došlo do otkazivanja, podatke o žrtvama, te glavni razlog otkazivanja kao i ljudski faktor (propust) koji je prethodio otkazivanju. Na temelju tih podataka provedena je statistička analiza i sistematizacija glavnih uzroka otkazivanja te ljudskog faktora koji im je prethodio. Svaki od glavnih uzroka je u poglavljima koja slijede dodatno podijeljen u potkategorije koje su objašnjene, navedeni su primjeri iz prakse (gdje su postojali javno dostupni podaci), te je provedena analiza da se utvrde najčešći uzroci otkazivanja. Analiza ljudskih

faktora provedena je po istom principu te je sumarna statistika prikazana u poglavlju 3.8. Sistematizacija baze otkazivanja mostova s obzirom na fazu uporabnog vijeka mosta u trenutku otkazivanja; fazu građenja, slobodnog prometovanja, sanacije, rušenja ili zatvorenog mosta prikazana je na slici 4.

Također, provedena je i analiza podataka o žrtvama (broj umrlih i ranjenih) te njihova povezanost s brojem otkazivanja kroz godine, prikazana na slici 3. [18]. Budući da podaci iz IABSE radne skupine ne predstavljaju sve slučajeve otkazivanja mostova u svijetu u danom razdoblju, statistička analiza otkazivanja nije navedena po zemljama u kojima su se ona dogodila, kako bi se izbjegla pristranost podataka.

Ova odluka dodatno je potkrijepljena novijim istraživanjima na temu uzroka i posljedica otkazivanja mostova koja su provedena u Indiji [19] i Kini [20], ali nisu zastupljena u bazi IABSE-a zato što potpuni podaci nisu javno dostupni. Podaci [19] pokazuju da je samo u Indiji u posljednja četiri desetljeća više od 2000 mostova i propusta potpuno ili djelomično otkazalo. Također, u radu u kojem je detaljno analizirano otkazivanje mosta Zijin u Kini 2019. godine, navedeni su podaci da je u Kini u razdoblju od 2009. do 2019. došlo do djelomičnog ili potpunog otkazivanja čak 418 mostova.

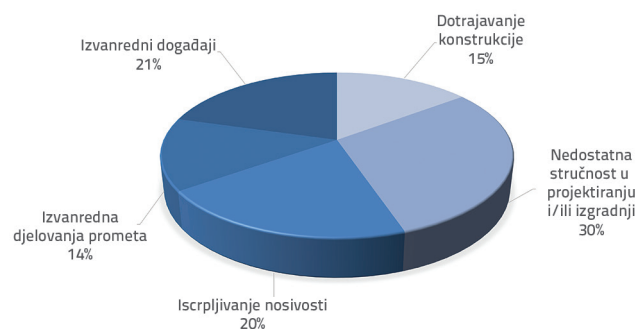


Slika 4. Faze uporabnog vijeka u kojima mostovi otkazuju

Mišljenje je autora da bi se dodavanjem potpunih podataka iz zemalja diljem svijeta u postojeću bazu, te njenom analizom, ostvarila mogućnost da se napravi sistematizacija otkazivanja mostova po državama te da se dovede u vezu s korištenim nacionalnim normama i propisima. Na taj bi se način provela bitna analiza uzročno-posljedične veze između propisa za projektiranje mostova i njihove trajnosti te broja otkazivanja, no takvo istraživanje zasad nije moguće te izlazi iz opsega ovog rada. Glavni uzroci otkazivanja mostova mogu se svrstati u pet skupina, a to su:

- nedostatna stručnost (u projektiranju i/ili izgradnji)
- iscrpljenje nosivosti
- izvanredni događaji
- dotrajavanje konstrukcije
- izvanredna djelovanja prometa

Ti uzroci su opisani detaljno u poglavljima 3.2 do 3.6., a njihova učestalost na temelju dostupnih podataka prikazana je na slici 5.



Slika 5. Glavni uzroci otkazivanja mostova

### 3.2. Nedostatna stručnost u projektiranju i/ili izgradnji

Stručne manjkavosti podrazumijevaju pogreške u projektiranju i/ili izgradnji, nemar u izgradnji i ograničeno znanje (slika 6.). Pogreške u projektiranju mogu biti pogreške u statičkom proračunu ili u oblikovanju detalja, odnosno pri izradi izvedbenih nacrti. Mogu nastati zbog nedovoljno znanja, nepoštivanja normi i propisa, zbog pogreški tijekom projektiranja u različitim fazama izgradnje, odnosno premalih predviđenih opterećenja na kritičnim mjestima. Pogreške u izgradnji mogu se dogoditi zbog nemara i neodgovornosti tijekom gradnje, međutim uzroci mogu biti i neprepoznati rizici ili zanemarena nestabilnost te oštećenja materijala. Kroz povijest su se otkazivanja koja su sa sobom odnijela brojne ljudske živote dogodila u fazi gradnje mosta kad je prisutan velik broj radnika na gradilištu [21]. Osim toga, projektiranje se provodilo na način da bi projektant samo napravio dijagrame naprezanja mosta, a za ostatak projekta odgovorni su bili proizvođač, nadzorni inženjer i izvođač [22]. Danas je propisana dvostruka kontrola projekata mehaničke otpornosti i stabilnosti za složenije građevine koje su, prema

[23] obvezne ići na reviziju kod drugog inženjera projektanta (revidenta) koji ima ovlaštenje prema [24] da bude revident takvog tipa konstrukcija, a čime se nastoje smanjiti pogreške u projektiranju.

Prema [25], dužnost nadzornog inženjera je da: Pozna je projekt i tehničko rješenje te tehnološki način kojim izvođač izvodi pojedine radove kako bi mogao uočiti potencijalna odstupanja. Također, jedna od važnijih funkcija nadzornog inženjera na gradilištu je kontrola sukladnosti ugrađenih materijala prema programu kontrole i osiguranja kvalitete. Norme za proizvodnju i razinu kontrole pri proizvodnji materijala su u novije vrijeme detaljno specificirane u odnosu na početak 20. stoljeća. U cjelokupnom procesu projektiranja/izgradnje/nadzora bitna je dobra komunikacija i uključenost svih sudionika procesa kako bi se zajedničkim dogovorom oko mogućih problema i usklađenja projektnih specifikacija s izvedbenim mogućnostima postiglo adekvatno rješenje. Nadzorni inženjer trebao bi biti upućen u projektiranje, a projektant u stvarno stanje na gradilištu pri izgradnji, što znatno smanjuje mogućnost pogreški.



Slika 6. Poduzroci za glavni uzrok otkazivanja - nedostatna stručnost

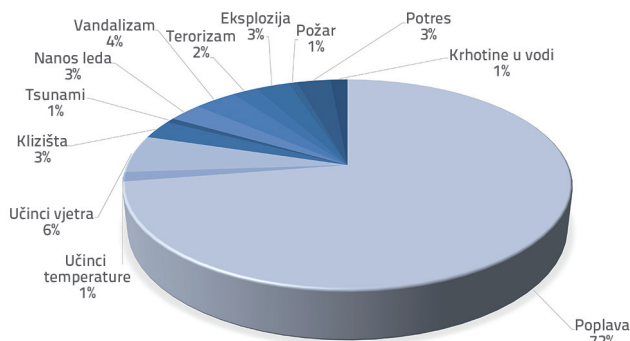
Novo rješenje za usavršavanje procesa planiranja/projektiranja / izgradnje / nadzora / uporabe građevine jest primjena BIM (*Building information modeling*) pristupa. BIM je višedimenzionalni integrirani sustav koji sadrži bazu podataka o projektu dostupnu svim odgovornim akterima, a sve s ciljem bolje djelotvornosti i kvalitete, usklađivanja projekta, učinkovitijeg upravljanja te eliminiranja mogućih pogrešaka i rizika vezanih uz projekt [26-28].

### 3.3. Izvanredni događaji

Nemoguće je predvidjeti sva djelovanja kojima će konstrukcija biti izložena za vrijeme uporabe. Prirodne nepogode poput potresa, poplava, oluja, vjetrova, tsunamija mogu imati razorne učinke, a njihove posljedice mogu biti i otkazivanja mostova ili njegovih dijelova. Povećanje broja otkazivanja mostova uslijed prirodnih pojava može se pripisati njihovoj gradnji na nepogodnijim terenima, ali i ekstremnijim vremenskim uvjetima [29]. Klimatske promjene koje se događaju širom svijeta dovode do češćih ekstremnijih prirodnih pojava, što postavlja veće zahtjeve na već dotrajalu infrastrukturnu mrežu [30]. Izvanredni

događaji prepoznati kao glavni uzroci otkazivanja prema analiziranoj bazi podataka prikazani su na slici 7.

Temeljito analiziranje pojava ekstremnih djelovanja često je ograničeno količinom i vrstom vjerodostojnih povijesnih podataka. Mjerenjem intenziteta tih pojava na specifičnom mjestu, te naknadnom statističkom analizom dolazi se do karakterističnih vrijednosti koje se uzimaju pri projektiranju sa dodatnim parcijalnim faktorima sigurnosti kako je definirano u Eurokodu [31]. Apsolutnu sigurnost konstrukcija nije moguće postići, a mostovi se uobičajeno projektiraju za uporabni vijek od 50 ili 100 godina, ovisno o tipu i karakteristikama.



Slika 7. Poduzroci za glavni uzrok otkazivanja - izvanredne pojave

Otkazivanje mosta Tacoma 1940. zasigurno je najpoznatije i najviše dokumentirano otkazivanje zbog utjecaja vjetra. Objavljeno je mnogo radova na temu uzročno posljedičnog slijeda otkazivanja toga mosta [32-34], a interes za tu tematiku ne jenjava. Općenito, aerostatičke i aerodinamičke sile uzrokovane vjetrom glavni su projektantski izazovi u projektiranju mostova, posebno za fleksibilne mostove dugog raspona [21]. Prema [35], *za visoke i vitke objekte, poput mostova, referentne desetominutne brzine vjetra koje preporučuje Eurokod [36] nisu relevantne za opisivanje turbulentnih karakteristika bure, već su potrebna sekundna profilna mjerenja na lokaciji objekta.*

Potresi su rijetki događaji koje neke konstrukcije tijekom uporabe možda nikada neće doživjeti na razini za koju su projektirane, pa se stoga opseg mjera opreza koje zajednica treba poduzeti za zaštitu od potresa često diskutabilan [37]. Međutim, kada se dogode, potresi velikih intenziteta za sobom donose katastrofalne posljedice, velika razaranja i ljudske gubitke. Protupotresno projektiranje mostova je tijekom 20. stoljeća doživjelo brojne promjene, koje su se uglavnom događale poslije većih potresa čije su posljedice bila velika oštećenja i/ili rušenja mostova. Potresi dovode do vertikalnih i horizontalnih

kretanja tla koja mogu uzrokovati podlokavanje tla na temeljima mosta, što može uvelike smanjiti nosivost temelja i dovesti do otkazivanja mosta [21]. Općenito, vjerojatnost oštećenja povećava se ako je kretanje tla posebno intenzivno, tlo je mekano, ili je most izgrađen prije primjene suvremenih normi [38].

Seizmičko projektiranje kontinuirano se nadopunjuje lekcijama iz prakse na temelju proučavanja odgovora konstrukcija na stvarne potrese te se rezultati normiraju i provode u praksu [39]. Primjer oštećenja upornjaka prilikom razornog potresa u Petrinji 2020. godine prikazan je na slici 8. Riječ je o mostu na jugozapadnom ulazu u Majske Poljane preko rijeke Maje. Most je loše održavan, a potres je dodatno razdrmao kamene blokove na upornjaku. Nakon potresa se na mostu odvijao intenzivan promet kamiona, dizalica, tegljača s kontejnerima te je na njemu hitno trebalo intervenirati nakon što je privremeno zatvoren za promet. Provedena je zaštita upornjaka od podlokavanja kamenim nabačajem čime se uz stabilnost tla temelja nastojao i proizvesti horizontalni tlak na zid i krila upornjaka kako se ona ne bi dalje pomicala. Ovim se mjerama most stabilizirao i učinio sigurnijim za prometovanje. Most pokazuje primjer, kao nažalost i niz drugih starijih mostova, kako se ne (prikladnim) održavanjem dopuštaju dotrajanja koja prilikom ovakvih izvanrednih događanja mogu predstavljati mnogo veći rizik za otkazivanje konstrukcije.

Promjenom klimatskih uvjeta povećao se i broj poplava i oluja. Postupno trošenje tla oko stupa mosta uobičajeni je uzrok otkazivanja mostova zbog utjecaja poplava [40], koje su najčešći poduzrok otkazivanja zbog izvanrednih događaja (slika 7.). Poplave mogu prouzročiti oštećenja donjeg ustroja mosta, pomake upornjaka ili stupova, a ako je voda dovoljno visoka, može oštetiti i ležajeve mosta. Poplave mogu dovesti do lokalnog podlokavanja (primarni učinci) ili oštećenja na konstrukciji poput



Slika 8. Most oštećen u potresu: oštećenja upornjaka pojačana djelovanjem potresa (lijevo) te interventna sanacija radi uspostavljanja sigurnosti prometovanja mostom (desno)

nagiba stupa, diferencijalnog slijeganja ili pucanja (sekundarni učinci) koji mogu rezultirati otkazivanjem konstrukcije ili njenih dijelova neposredno ili posredno budući da, naprimjer, za takvu konstrukciju nekritično seizmičko opterećenje može postati kritično [40]. Poplave također mogu izravno oštetiti gornji ustroj mosta ako ga razina vode tijekom poplava premaši, što rezultira oštećenjima ovisno o vremenu provedenom pod vodom. Primjer djelomičnog otkazivanja mosta uslijed podlokavanja i erozije tla je željeznički most Sava-Jakuševac u Hrvatskoj, koji je 2009. godine bio zatvoren za promet nakon što je visoka razina rijeke ispod mosta prouzročila podlokavanje i velike pomake jednog od stupova, što je rezultiralo progibima čeličnog gornjeg ustroja [42].

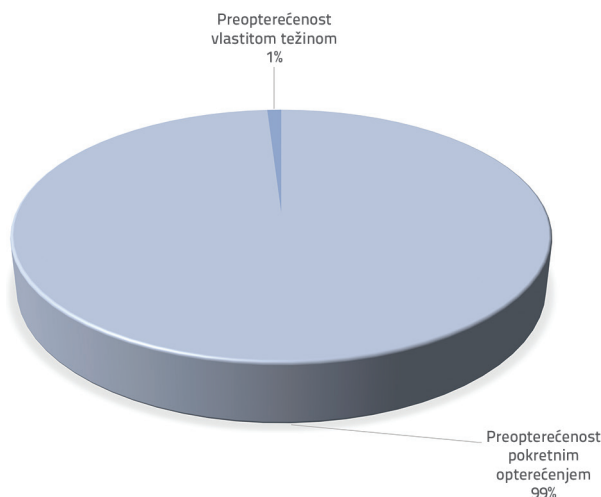
Otkazivanje mostova kao posljedica požara vrlo je rijedak slučaj u današnje doba, za razliku od prošlosti kada su mostovi bili građeni od drva. Utjecaj požara na konstrukcije mosta očituje se u smanjenju krutosti materijala i toplinskom širenju. Smanjenje krutosti čelika je nelinearno, a krutost koja postaje vrlo niska pri visokim temperaturama, dovodi do velikih pomaka i plastičnog ponašanja konstrukcije mosta [43]. U radu [44] opisana je nesreća i rekonstrukcija mosta nakon što se zapalio kamion koji je prevezio naftu te je most zahvatio požar. Brzom reakcijom vatrogasaca uspjelo se spriječiti da čelik dosegne kritičnu temperaturu od 723 °C, postane krhak i dođe do otkazivanja konstrukcije. Prema [45], armiranobetonske konstrukcije se općenito smatraju otpornima na učinak požara zbog toplinskih svojstava betona i zaštite koju pruža armatura.

Osim ekstremnih vrijednosti prirodnih pojava, na koje konstrukcije uobičajeno nisu projektirane, mostovi su podložni i drugim raznim izvanrednim pojavama poput eksplozija, terorističkih djelovanja, vandalizama i ratnih razaranja. Takva izvanredna djelovanja općenito nisu detaljno specificirana za uzimanje u obzir pri projektiranju, iako norma HRN EN 1991-1-7 daje smjernice za projektiranje na eksplozije [46].

### 3.4. Iscrpljenje nosivosti

Prema sadašnjoj normi za projektiranje, konstrukcije mostova za cestovni promet trebale bi biti u stanju izdržati karakteristične vrijednosti opterećenja za 1000-godišnji povratni period (ili vjerojatnost prekoračenja 5 % u 50 godina) za promet na glavnim cestama u Europi. Međutim, velik broj postojećih mostova je projektiran za prometno djelovanje koje je bilo predviđeno u vrijeme projektiranja, prema tadašnjim normama [47], koje nisu bile konzervativne kao današnje [48].

Iscrpljenje nosivosti mosta kao glavni uzrok otkazivanja mostova podrazumijeva preopterećenost mosta vlastitom težinom ili preopterećenost mosta pokretnim opterećenjem. Iz analize baze podataka preopterećenost mosta vlastitom težinom odgovorna je za 1 % otkazivanja, a za preostalih 99 % uzrok je bila preopterećenost mosta pokretnim (prometnim) opterećenjem (slika 9).



Slika 9. Poduzroci za glavni uzrok otkazivanja - iscrpljenje nosivosti

U proteklih nekoliko desetljeća svjedoci smo porasta broja stanovnika na svijetu i nagle urbanizacije, što dovodi do širenja gradova te do povećanja prometa na već postojećim mostovima [49]. Prema [50], udio urbanih područja povećao se sa 30 % u 1950. godini na 55 % u 2018. Nadalje, prema [51], projicirano je da će se broj motornih vozila na cesti povećati s milijarde u 2010. godini do dvije milijarde u 2030. godini. U isto vrijeme, zbog zahtjeva za prijevozom tereta na željezničkim prugama i cestama, obujam prometa se znatno povećao, što je dovelo do povećanja broja teških vozila u prometnim tokovima, a zbog ekoloških razmatranja postoji i tendencija daljnjeg povećanja dopuštenih opterećenja [52].

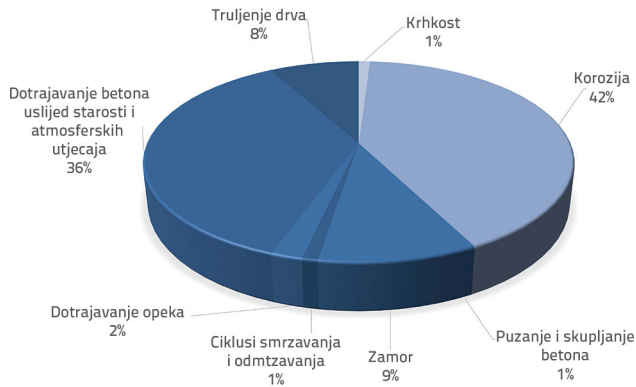
Očigledno je da su postojeći mostovi suočeni s nadilaženjem onih kapaciteta za koje su prvotno planirani i projektirani. U takvim okolnostima, zbog preopterećenja konstrukcije, dolazi do iscrpljenja nosivosti i tada most otkáže. Prema [40], dva glavna uzroka otkazivanja mostova su učestalost i težina kamiona, posebno kod starijih mostova zbog povećanja težine kamiona, te bi za neke od njih trebalo razmotriti ograničenja težine kako bi se izbjegla otkazivanja zbog preopterećenja. Osim toga, preopterećenja mostova mogu pridonijeti ubrzanju oštećenja od zamora na čeličnim i spregnutim mostovima [40, 53]. No, modeliranju utjecaja prometnog opterećenja u postupku ocjenjivanja postojećih mostova treba pristupiti drugačije nego kod projektiranja novih [49].

### 3.5. Dotrajavanje konstrukcija

Građevine općenito pa tako ni konstrukcije mostova nisu vječne, niti su projektirane da traju vječno. Jednom kada se sagrađe, zahtijevaju adekvatno održavanje i upravljanje da bi se dosegla planirana trajnost. Materijali od kojih se grade mostovi podložni su raznim utjecajima koji dovode do njihovog dotrajavanja. Trajnost konstrukcije je zahtijevana tijekom projektiranja, pa je tako prema Zakonu o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)



[54] temeljni zahtjev za građevinu *održiva uporaba prirodnih izvora* koja mora jamčiti *trajnost građevine*, a prema normi HRN EN 1990 [31] konstrukcija mora biti proračunana *tako da ima odgovarajuću konstrukcijsku otpornost, uporabljivost i trajnost te tako da pogoršanje tijekom njezina proračunskog uporabnog vijeka ne utječu nepovoljno na svojstva konstrukcije više od predviđenog, uzimajući u obzir okoliš i predviđenu razinu održavanja.*



Slika 10. Poduzroci za glavni uzrok otkazivanja - dotrajavanje konstrukcija

Među procese koji utječu na dotrajavanje konstrukcije (slika 10.) i vode do njezina otkazivanja ubrajaju se korozija, dotrajavanje

betona uslijed starosti i atmosferskih utjecaja, zamor, truljenje drva, dotrajavanje opeke, ciklusi smrzavanja i odmrzavanja, puzanje i skupljanje te krhkost.

Osim toga, utjecaj na ubrzano dotrajavanje konstrukcija mogu imati i klimatske promjene poput povišenih temperatura, povećane količine oborina, porasta relativne vlažnosti i veće koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi [55]. Za proračun trajnosti konstrukcija bitna je analiza djelovanja iz okoliša i identifikacija mehanizama dotrajavanja. Procesi poput korozije čelika, karbonizacije betona i truljenje drva ograničavaju njihov vijek trajanja [56]. Korozija čelika je velik problem za trajnost čeličnih konstrukcija, ali i korozija armature u betonu [57-59]. Takav utjecaj na dotrajavanje betona kod mostova prikazan je na slikama 11. i 12. Slika 11. prikazuje oštećenja vijadukta Bukovo koji je izgrađen početkom 80-ih godina 20. stoljeća, a u doba pisanja ovoga rada, dakle nakon 40 godina uporabnog vijeka pod temeljitom je sanacijom. Oštećenja zagrebačkih mostova prikazana su na slici 12. Tijekom nekoliko zadnjih godina počelo je njihovo saniranje no vrste i razine oštećenja prije ulaska u same sanacije, uz ispravan pristup održavanju, ne bi se ni trebale dopustiti.

Primjeri iz prakse ukazuju da je neprikladno održavanje, odnosno prepuštanje nekontroliranom dotrajavanju, velik problem postojećih mostova. Mnoga otkazivanja mogla su biti spriječena s većim brojem pregleda, ispitivanja i aktivnostima redovitog održavanja. Isto tako, mnoga urušavanja mostova koja se

dogode iz niza drugih razloga dijelom su neposredno povezana s lošim pregledima i/ili neredovitim održavanjem. Kada je most izgrađen, upravitelji (koncesionari) mosta imaju obvezu provoditi prikladnu razinu održavanja koja je neophodna da most ostvari planirani životni vijek i koja mora biti provedena u skladu s projektnim odredbama, ali i važećim zakonima. Dotrajali dijelovi moraju biti zamijenjeni, a ako su razine prometa povećane, treba nakon ocjenjivanja po potrebi pristupiti i ojačanju konstrukcije.



Slika 11. Oštećenja na nosivim dijelovima vijadukta Bukovo zbog korozije i dotrajavanja betona



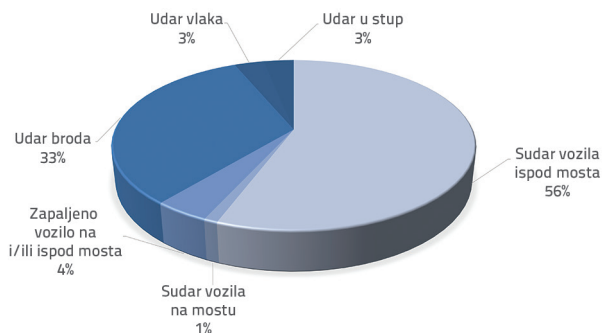
Slika 12. Oštećenja na nosivim dijelovima na mostovima u gradu Zagrebu zbog korozije

### 3.6. Izvanredna djelovanja prometa

Izvanredna djelovanja prometa koja za posljedicu mogu imati otkazivanje mostova jesu različite prometne nesreće te udari vozila ili plovila o dijelove mosta. Nesreće se mogu dogoditi zbog utjecaja cestovnog prometa na most ili ispod njega te zbog udara plovila u gornji ili donji ustroj mosta. Nesreće se događaju jer se ne uzima u obzir vertikalni razmak, odnosno sudar s konstrukcijom mosta prouzročen visokim vozilima ili teretom, iskakanja vlakova iz tračnica na mostu

ili prije mosta te od pomaka tračnica. Mogu se dogoditi i zbog vozila koja skrenu s prometne površine mosta zbog leda na cesti ili neprilagođene brzine, te udare u dijelove mosta ili se sudare s drugim vozilom. Na mostovima preko plovnih putova može se dogoditi da brod udari u most, u dio rasponskog sklopa, u luk ili stup mosta. Iako brodovi sporo prolaze ispod mosta u usporedbi s vlakovima ili vozilima na mostu, problem je njihova golema masa, pa i mali kontakt broda s mostom može prouzročiti njegovo otkazivanje [40].

Glavni uzroci izvanrednog djelovanja prometa na otkazivanje mostova prikazani su na slici 13. Povećanje otkazivanja mostova zbog sudara može se pripisati kontinuiranom porastu potražnje za prijevozom, što je rezultiralo brojnim udarima plovila u elemente mostova [29]. Norma HRN EN 1991-1-7 [46] daje smjernice za projektiranje na izvanredna djelovanja od prometa, kao što su udar cestovnih vozila, vlakova i brodova, pri čemu treba odrediti proračunske vrijednosti djelovanja udara na oslonce konstrukcije (npr. stupove, lukove i upornjake mostova). Pri odabiru vrijednosti djelovanja udara na konstrukciju uzimaju se u obzir posljedice udara, očekivani obujam i vrsta prometa i sve primijenjene mjere ublažavanja, a prikazuju se istovrijednom statičkom silom [46]. Prema HRN EN 1991-2 [48]: *Moraju se uzeti u obzir opterećenja cestovnim vozilima u izvanrednoj proračunskoj situaciji, gdje je mjerodavno, a potječu od sudara vozila sa stupaštim mosta, pogledom mosta ili s rasponskim sklopom, prisutnosti teških kotača ili vozila na pješačkim stazama, sudara vozila s rubnjacima, ogradama za vozila i konstrukcijskim dijelovima.* Poučeni katastrofama iz prošlosti uvedene su neke mjere opreza pri projektiranju novih mostova kao što su projektna rješenja bez središnjih stupova na prometnicama, a u slučaju kada su stupovi ipak neizbježni, izvode se mnogo robusniji. Na željeznici su razmaci između pruge i stupova povećani, a stupovi se dimenzioniraju na mnogo veća udarna opterećenja. Na postojećim mostovima, stupovima koji imaju slabu udarnu otpornost, nastoji se povećati sigurnost izvedbom betonskih zaštitnih zidova.



Slika 13. Poduzroci za glavni uzrok otkazivanja - izvanredna djelovanja prometa

### 3.7. Ljudski faktori pri otkazivanju mostova

Iako je poznavanje svih tehničkih aspekata od presudne važnosti pri provođenju istrage o otkazivanju mostova, ipak često ljudski

faktori mogu prevladati. Forenzički inženjer Neal FitzSimons ljudske faktore je opisao kao: *četiri konjanika inženjerske apokalipse: neznanje, nesposobnost, nemarnost i pohlepa* [60].

Ljudske pogreške mogu biti slučajne ili namjerne. Upravljanje ljudskim faktorima u svim fazama nastajanja i uporabe konstrukcije iznimno je važno. Unatoč tome što se norme i propisi stalno unapređuju, ljudske pogreške se uspijevaju smanjiti, ali još uvijek postoje, a njihove posljedice često mogu biti katastrofalne. Pri procjeni pouzdanosti konstrukcija, treba se usmjeriti na važnost ljudskog faktora kao složenog i nepredvidivog parametra te razumjeti da pouzdanost konstrukcija ne ovisi samo o jednoj odluci, budući da je podložna utjecaju brojnih nesigurnosti. U analiziranoj bazi podataka za svako otkazivanje mosta, uz glavni uzrok otkazivanja, pridružen je ljudski faktor kao dodatni razlog otkazivanja, odnosno način na koji se utjecajem čovjeka otkazivanje moglo spriječiti. Ljudski faktori koji su prepoznati kao takvi u ovoj su analizi svrstani i prikazani na slici 14.

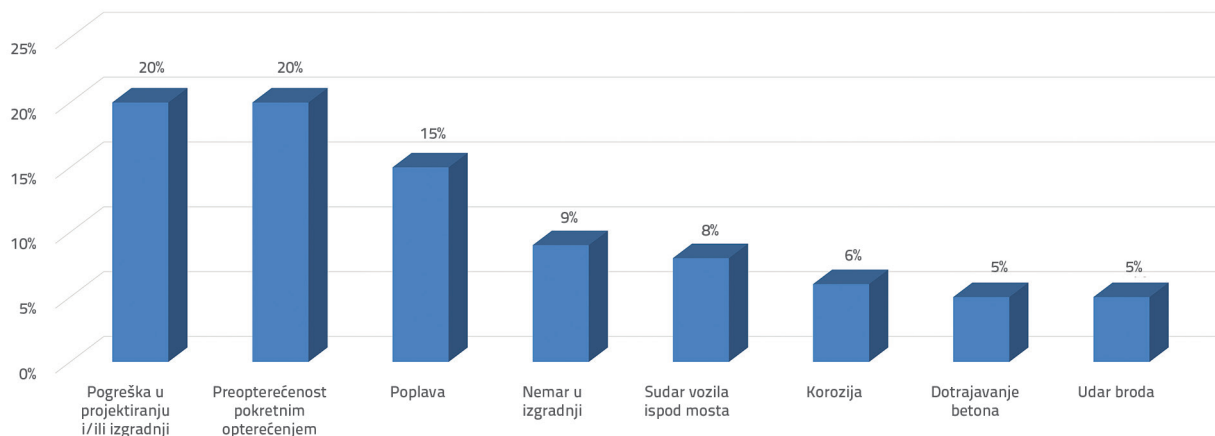


Slika 14. Ljudski faktori pri otkazivanju mostova

### 3.8. Rasprava

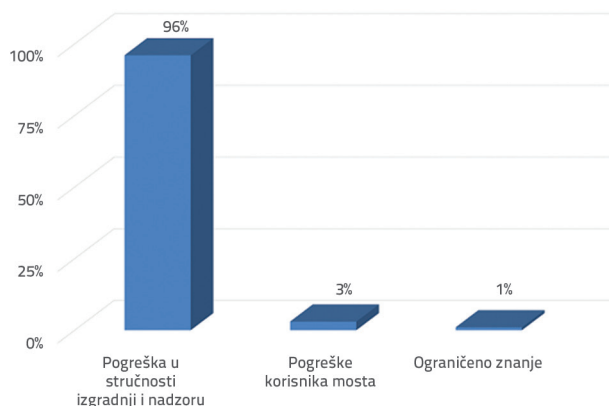
Do otkazivanja mosta najčešće nije došlo uslijed samo jednog faktora. Glavni uzrok je najčešće okidač u uzročnopsljedičnom slijedu niza događaja koji su tome pridonijeli. Glavni uzroci otkazivanja u dostupnim podacima se mogu svrstati u pet osnovnih kategorija: nedostatna stručnost u projektiranju i/ili izgradnji sa 30 %, izvanredni događaji sa 21 %, iscrpljenje nosivosti sa 20 %, dotrajavanje konstrukcije sa 15 % te izvanredna djelovanja prometa sa 14 % (slika 5.).

Najčešći pojedinačni glavni uzroci otkazivanja su pogreške u projektiranju i/ili izgradnji (pogreške u projektiranju; pogreške u izgradnji; pogreške u projektiranju i izgradnji) i preopterećenost pokretnim opterećenjem sa po 20 % svih otkazivanja mostova iz baze podataka (slika 15.). Slijede poplave koje su odgovorne za 15 % svih otkazivanja mostova, nemar u izgradnji sa 9 %, sudar vozila ispod mosta sa 8 %, korozija sa 6 %, dotrajavanje betona uslijed starosti i atmosferskih utjecaja te udar broda sa po 5 % (slika 15.). Tih osam navedenih uzroka bili su glavni okidači za 88 % svih otkazivanja mostova iz analiziranih podataka.

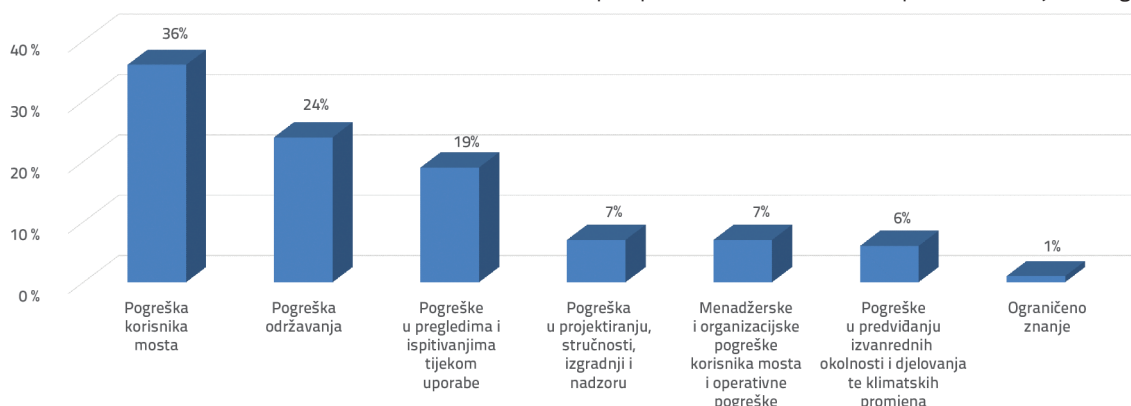


Slika 15. Najučestaliji poduzroci glavnih uzroka otkazivanja mostova

Neosporno je da ljudski faktor može imati veliku ulogu pri otkazivanju mostova. Najčešći ljudski faktor (slika 14.) odnosi se na pogreške u projektiranju, stručnost, izgradnju i nadzor sa 30 %, slijede ih pogreške korisnika mosta sa 27 %, pogreške održavanja sa 18 %, pogreške u pregledima i ispitivanjima tijekom uporabe sa 14 %, pogreške u predviđanju izvanrednih okolnosti i djelovanja te klimatskih promjena sa 5 %, menadžerske i organizacijske pogreške tijekom uporabe i operativne pogreške sa 5 % te ograničeno znanje sa 1 %.



Slika 16. Ljudski faktor u fazi izgradnje



Slika 17. Ljudski faktor u fazi slobodnog prometovanja

Zanimljivo je spomenuti da su u fazi izgradnje mosta pod utjecajem ljudskog faktora dominantna otkazivanja koja proizlaze iz pogrešaka pri projektiranju, stručnosti, izgradnji i nadzoru sa čak 96 % (slika 16.). U fazi slobodnog prometovanja među najučestalije utjecaje ljudskog faktora pri otkazivanju mostova ubrajaju se u pogreške korisnika mosta sa 36 % (slika 17.). Boljim gospodarenjem mostovima i detaljnim uputama o tipu nužnih pregleda i njihovoj učestalosti, načinima provođenja takvih pregleda te potrebnim kompetencijama stručnog osoblja, broj otkazivanja mostova mogao bi se smanjiti. Identificiranje dotrajalih dijelova konstrukcije i oštećenja koja bi mogla propagirati nužno je za vrijeme faze uporabnog vijeka mosta. Naime, ne upravlja li se njime na adekvatan način, konačni trošak mogao bi biti mnogo veći ako do otkazivanja uistinu dođe, kao što je prikazano u [47].

## 4. Preporuke za sprječavanje progresivnog kolapsa ostvarenjem robusnosti konstrukcija

### 4.1. Uvod

Postupci pri projektiranju novih konstrukcija prema suvremenim normama [31], temelje se na teoriji pouzdanosti te korištenju poluprobabilističkih metoda proračuna koje nesigurnosti u

proračunu uzimaju u obzir pomoću definiranih parcijalnih faktora za modeliranje utjecaja opterećenja te nosivosti konstrukcije. Za postojeće konstrukcije, naročito mostove koji su projektirani prema starijim normama, te konstrukcije koje se ubrajaju u veći razred važnosti, preporučuju se probabilističke metode temeljene na određivanju vjerojatnosti otkazivanja, koje daju povoljnije rezultate proračuna [47, 49, 61].

U postupku projektiranja novih konstrukcija, s obzirom na njihovu važnost i zahtijevanu razinu pouzdanosti, potrebno je razmotriti moguće tipove i načine otkazivanja koji se, s obzirom na vrstu nosive konstrukcije te vanjske utjecaje, mogu dogoditi. Na ovaj način se u postupku projektiranja nastoji izbjeći da konstrukcija pretrpi oštećenja koja su nerazmjerna vanjskim utjecajima, a mogu dovesti do potpunog uništenja konstrukcije [62]. Takva pojava naziva se progresivni kolaps, pri čemu uslijed otkazivanja manjeg dijela dolazi do postupnog otkazivanja cijele konstrukcije [63, 64]. Da bi konstrukcija podnijela nepredviđene događaje ili okolnosti, a da pritom ne dođe do kritičnog oštećenja njezine nosivosti, mora posjedovati dovoljnu preostalu sposobnost da se odupre zahtjevima za vrijeme i nakon oštećenja. Preostala sposobnost konstrukcije (kapacitet) najčešće se odnosi na otpornost konstrukcije (nosivost), ali također može značiti i deformabilnost, duktilnost, stabilnost, težinu, masu i krutost jer bilo koje od tih svojstava može u pojedinom slučaju biti kritično [65]. Takva sposobnost konstrukcije se jednim pojmom definira kao njezina robusnost te obuhvaća veći broj elemenata koje treba razmotriti radi odabira prikladne strategije za projektiranje sigurne i robusne konstrukcije [62], a sve su one usmjerene smanjivanju opasnosti od otkazivanja. U ovome poglavlju dan je kratak pregled i veza između pojmova progresivni kolaps i robusnost te njihova uloga u projektiranju novih konstrukcija.

## 4.2. Progresivni kolaps

Pojam progresivnog kolapsa počeo se upotrebljavati nakon urušavanja zgrade Ronan Point 1968. godine. Samo dva mjeseca nakon završetka izgradnje, eksplozija plina u kutu 18. kata raznijela je vanjski zid i otkazivanje kutnog dijela zgrade proširilo se prema krovnoj konstrukciji te spustilo do razine tla zgrade od 22 kata. Posljedice su smatrane neprihvatljivim za veličinu početnog oštećenja, što je potaknulo istraživanja o progresivnom kolapsu [62]. Nakon toga, progresivni kolaps je dodatno dobio na pozornosti nakon terorističkog napada na WTC 2001. godine, kada su se, zahvaljujući djelomice i razvoju računalnih znanosti, istraživanja na području progresivnog otkazivanja konstrukcija intenzivirala.

Glavna karakteristika progresivnog kolapsa je ta da početno lokalno oštećenje dijela konstrukcije napreduje lančanom reakcijom koja uzrokuje potpuno ili djelomično otkazivanje konstrukcije (ili dijela konstrukcije), pri čemu je stupanj razaranja nerazmjerno veći od veličine početnog oštećenja [66-68]. Ako postoji nerazmjer između malog inicijalnog događaja i posljedičnog otkazivanja konstrukcije velikog razmjera,

govorimo o nerazmjernom kolapsu. Međutim, progresivni kolaps može dovesti do nerazmjernog kolapsa, a nerazmjerni kolaps ne mora biti progresivni, iako je čest slučaj da se nerazmjerni kolaps događa progresivno [69]. Starosseku [70] definira šest tipova progresivnog kolapsa: *pancake-type*, *zipper type*, *domino type*, *section type*, *instability type* i *mix type*.

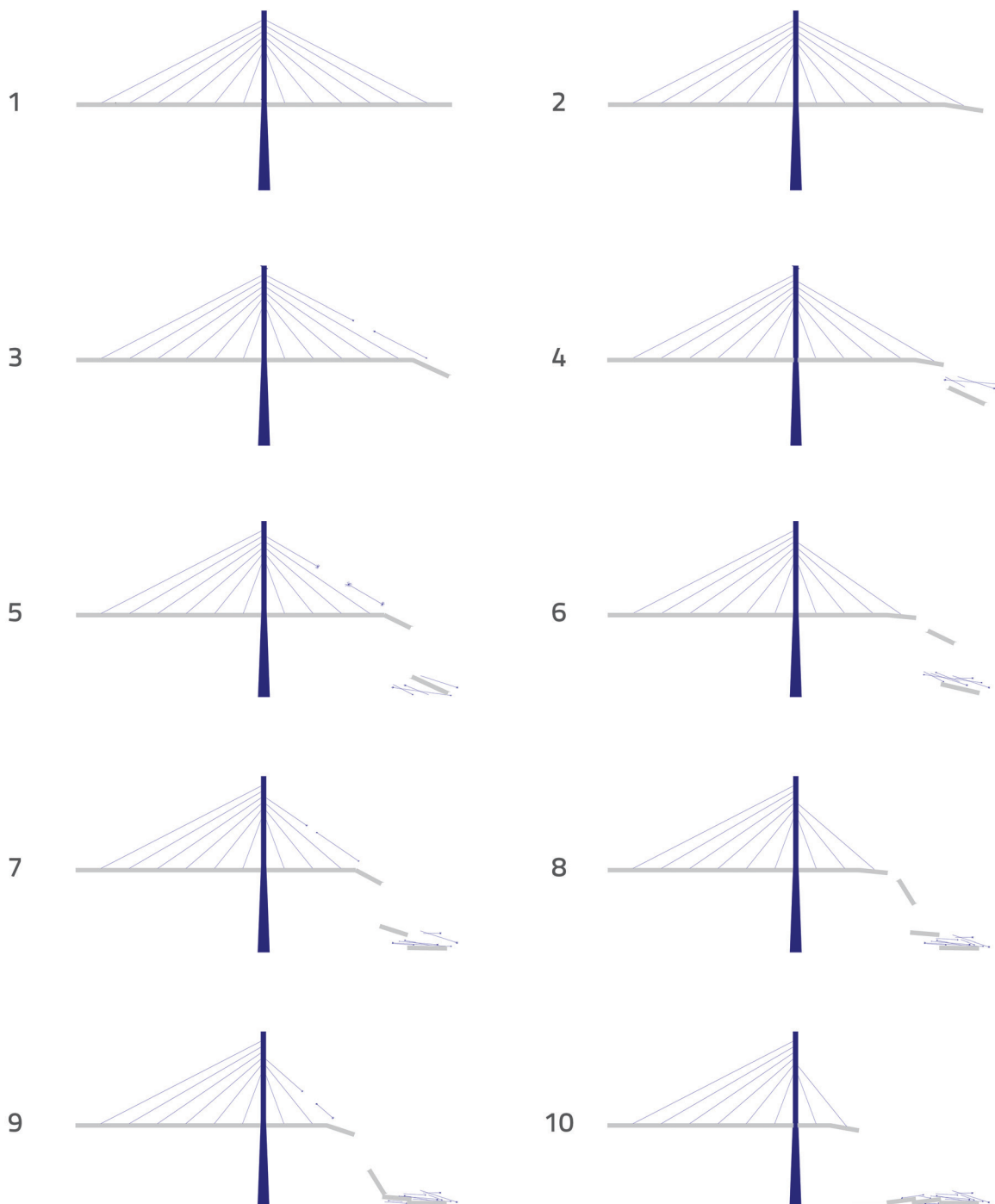
- *Pancake* tip kolapsa se događa kada element konstrukcije nakon iscrpljenja vertikalne nosivosti pada prema dolje gravitacijski i time dobiva kinetičku energiju da sila udara pada tog dijela konstrukcije na donji element obično prelazi opterećenje na koje je projektirana preostala konstrukcija i dolazi do progresivnog kolapsa.
- Kada se dogodi otkazivanje nosivog elementa konstrukcije, pri čemu se opterećenje koje taj element nosi prenese na druge dijelove konstrukcije te oni otkazuju i otkazivanje napreduje poprečno u odnosu na smjer glavnih sila u elementima koji otkazuju, tada se radi o *zipper* tipu kolapsa. Primjer tog tipa otkazivanja prikazan je na slici 18.
- Karakteristika *domino* tipa kolapsa je početno otkazivanje prevrtanjem jednog nosivog elementa koje se nastavlja na ostale elemente koji, zahvaćeni udarom, izgube svoju stabilnost, pa otkazivanje napreduje u horizontalnom smjeru.
- Kada na gredi, koja je pod utjecajem momenta savijanja, dio poprečnog presjeka raspuca, tada se unutarne sile koje prenosi taj dio preraspodjeljuju u preostali dio poprečnog presjeka te takvo povećanje naprezanja može uzrokovati otkazivanje kroz cijeli poprečni presjek što nazivamo *section* tipom otkazivanja.
- Otkazivanje tipa nestabilnosti (*instability*) karakterizira otkazivanje elementa koji je dio stabilizacije cijelog sustava ili nekog njegovog dijela, što može dovesti do kolapsa cijele konstrukcije.
- Kombinacijom različitih tipova otkazivanja nastat će mješoviti (*mix*) kolaps.

Karakteristika *zipper* i *section* tipa progresivnog otkazivanja je redistribucija sila u preostale elemente nakon otkazivanja inicijalnog elementa, a glavna karakteristika *pancake* i *domino* tipa je pretvorba potencijalne energije u kinetičku i uvođenje novonastale energije udarom ponovno u konstrukciju, bilo padanjem ili prevrtanjem elementa. Otkazivanje visećeg mosta Tacoma Narrows je primjer *zipper* tipa progresivnog otkazivanja [71], a otkazivanje grednog mosta Hongqi tipičan je primjer *domino* tipa progresivnog otkazivanja [72, 73]. Na slici 18. dan je shematski prikaz *zipper* tipa progresivnog otkazivanja na općenitom primjeru ovješnog mosta, a na slici 19. shematski prikaz *domino* tipa progresivnog otkazivanja na primjeru grednog mosta.

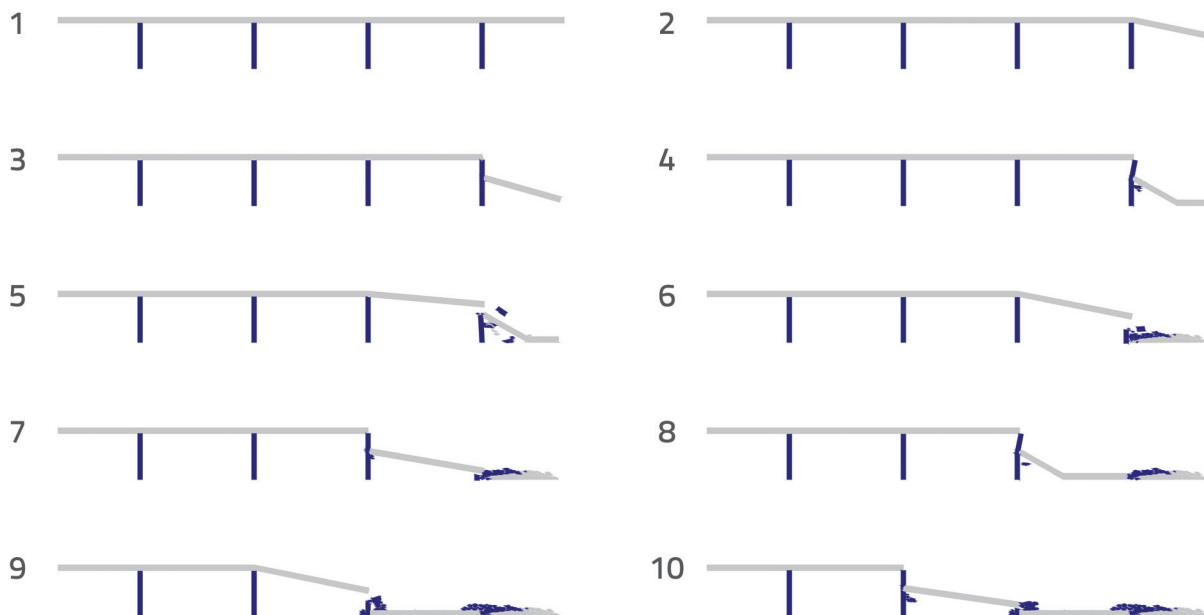
Da bi se pomoglo inženjerima i projektantima uočiti kritične elemente koji mogu biti razlog početnog lokalnog otkazivanja pri projektiranju mostova, primjenjuju se kvalitativna ili kvantitativna metoda *fault tree*. Razvijanje kvalitativnog *fault tree* dijagrama započinje s otkazivanjem mosta, i razvija se u

primarne komponente mosta čije otkazivanje može dovesti do otkazivanja cijelog mosta [74], a zatim se svaka komponenta raspodjeljuje u događaje koji mogu izravno dovesti do njenog

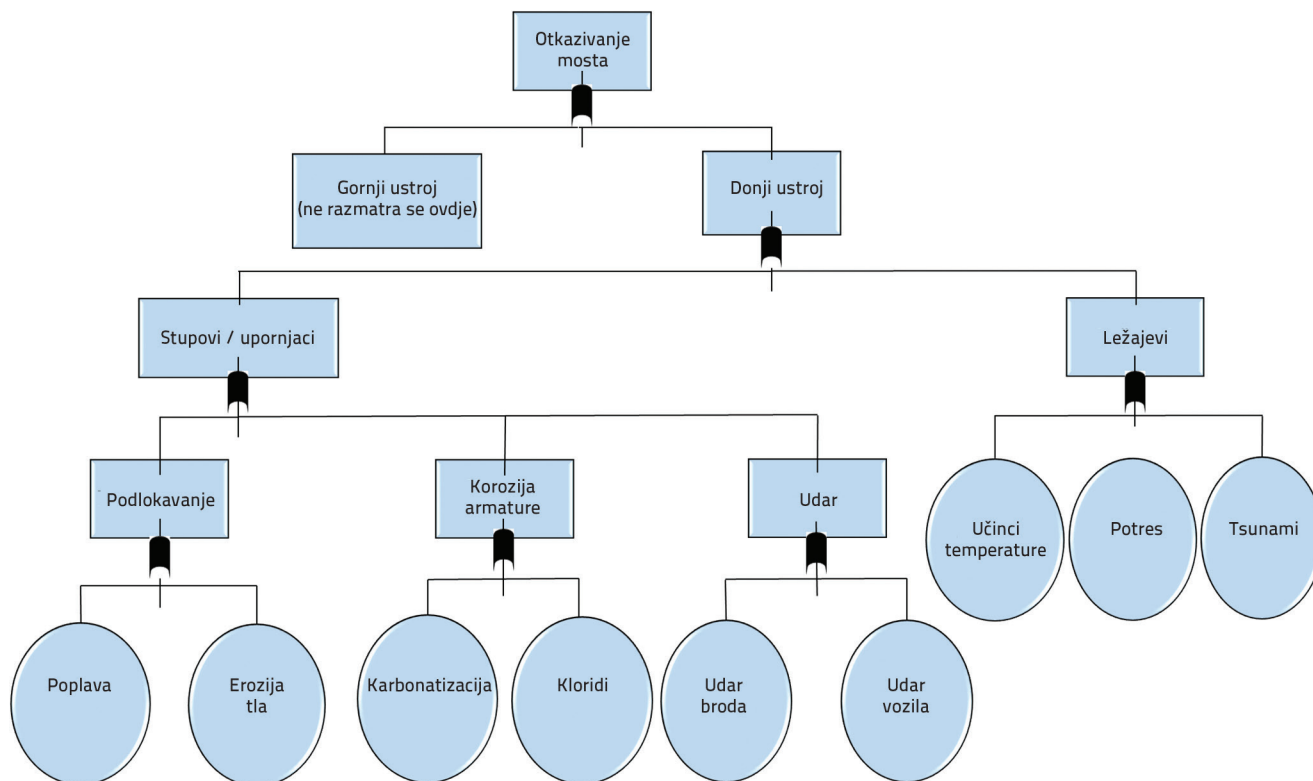
otkazivanja. Na slici 20. je prikazan općeniti primjer mogućeg kvalitativnog razvoja fault tree dijagrama za donji ustroj betonskoga grednog mosta u fazi uporabe.



Slika 18. Zipper tip progresivnog otkazivanja ovješnog mosta



Slika 19. Domino tip progresivnog otkazivanja grednog mosta



Slika 20. Fault tree dijagram

### 4.3. Robusnost konstrukcija

Proteklih desetljeća mnogi su znanstvenici pokušali matematički definirati robusnost, ali još uvijek ne postoji jedinstvena i općeprihvaćena definicija [62, 64]. Međutim, postoji mnogo različitih pristupa da se pojam što ispravnije i sveobuhvatnije

definira. Ni u jednoj europskoj normi nije dan direktan proračun robusnosti, već samo opća pravila i mjere koje bi mogle povećati robusnost konstrukcije.

Prema [62], posljedice koje su povezane sa svim mogućim scenarijima otkazivanja i oštećenjima konstrukcije klasificiraju kao direktne ( $R_{Dir}$ ), tj. povezane s početnim oštećenjem

konstrukcije, i indirektna ( $R_{Ind}$ ), povezane s naknadnim otkazivanjem sustava, sustav se smatra robusnim ovisno o vrijednosti indeksa robusnosti ( $I_{Rob}$ ) koji je definiran izrazom (1):

$$I_{Rob} = \frac{R_{Dir,1}}{R_{Dir,1} + R_{Ind,1}} \quad (1)$$

Vrijednost indeksa robusnosti prema jednadžbi (1) je od 1 za potpuno robusne konstrukcije (sve posljedice oštećenja su direktne - razmjerne oštećenju) do 0 za konstrukcije kod kojih su sve posljedice oštećenja nastale kao indirektna (nerazmjerne razini oštećenja).

Općenito, za proračun robusnosti mogu se koristiti i matematički modeli koje možemo podijeliti na determinističke, probabilističke i modele na osnovi teorije rizika [75]. Pojam robusnosti je prema Knollu i Vogelju [65]: *Svojstvo sustava koje mu omogućava da preživi nepredvidive ili neobične događaje*. Prema [76], robusnost je svojstvo konstrukcije da zadrži svoju funkciju čak i prilikom ekstremnih promjena u svom nosivom sustavu ili tijekom vanjskih utjecaja. Većina suvremenih propisa i normi ne definira pojam robusnosti i ne daje eksplicitni postupak na koji je način odrediti, ali zahtijeva da nove konstrukcije budu projektirane kao robusne. Tako norma HRN EN 1990 [31] zahtijeva robusnost samo implicitno i to na sljedeći način: *Konstrukcija mora biti proračunana i izvedena tako da neće biti oštećena događanjima kao što su eksplozija, udar i posljedice ljudskih pogrešaka do mjere koja je nerazmjerna izvornomu uzroku*, a prema JCCS [77]: *Konstrukcija ne smije biti oštećena događanjima kao što su požar, eksplozije ili posljedice ljudskih pogrešaka, učinci dotrajavanja i slično, u opsegu nerazmjernom ozbiljnosti početnog događaja*. Prema HRN EN 1991-1-7 [46]: *Lokalni slom od izvanrednih djelovanja smije biti prihvatljiv, pod uvjetom da neće ugroziti stabilnost cijele konstrukcije i da će konstrukcija očuvati opću sposobnost prijenosa opterećenja i dopustiti poduzimanje neophodnih hitnih mjera te U svrhu ublažavanja rizika povezanog s ekstremnim događanjima u zgradama i inženjerskim konstrukcijama, treba razmotriti jednu ili više mjera: konstrukcijske mjere, kad su konstrukcija i konstrukcijski elementi proračunani tako da imaju rezerve čvrstoće ili zamjenske putove opterećenja u slučaju lokalnih slomova ili ne-konstrukcijske mjere, koje obuhvaćaju smanjenje vjerojatnosti pojave događaja, intenziteta djelovanja ili posljedice sloma*.

Slično, prema [69], nekonstrukcijski pristup provodi se kroz zaštitu konstrukcije od izvanrednog događaja ili kontrolu izvanrednog događaja u pogledu smanjenja vjerojatnosti pojave događaja ili njegovog intenziteta, a konstrukcijski aspekti uzimaju se u obzir kroz izravno i neizravno projektiranje. Na taj način izravno projektiranje nastoji izričito osigurati otpornost na otkazivanje pokazujući da konstrukcija udovoljava određenim ciljevima izvedbe kada se podvrgne specifičnim scenarijima opasnosti. Neizravno projektiranje ima cilj povećati otpornost na otkazivanje konstrukcije implicitno uključivanjem sporazumnih projektnih značajki koje se provode bez razmatranja scenarija

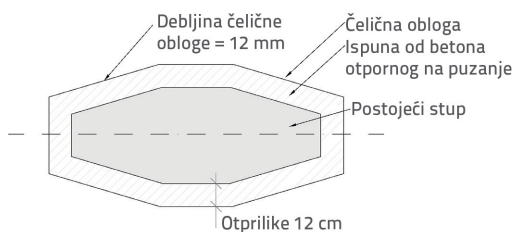
na neočekivani događaj i bez dokazivanja ispunjavanja ciljeva izvedbe [69]. Starossek pak navodi pet strategija za sprječavanje progresivnog kolapsa [78]:

- postizujući visoku sigurnost protiv lokalnih otkazivanja (lokalnom otpornosti ključnih elemenata ili kontrolom događaja)
- projektiranjem za opterećenje lokalno otkazivanje (alternativnim načinom opterećenja ili izolacijom odjeljivanjem)
- propisanim pravilima projektiranja.

Norme za projektiranje su temeljene na razmatranju lokalnog otkazivanja, primjerice, provjera poprečnog presjeka ili stabilnost elementa. Međutim, za osiguranje globalne sigurnosti sustava potrebo je, osim sigurnosti svih elemenata protiv lokalnog otkazivanja, provjeriti i odgovor sustava na lokalno otkazivanje [78]. Pri projektiranju za opterećenje "lokalno otkazivanje" elementi i načini prijenosa opterećenja alternativnim putevima opterećenja mogu varirati od mobilizacije fleksibilnog kapaciteta glavnog nosivog elementa, mobilizacije aksijalne ili torzijske otpornosti ili putem iskorištavanja plastičnih rezervi u konstrukciji, prijelaza od savojne do otpornosti na vlak, ili od ravnine do prostornog konstrukcijskog ponašanja. Izolacija odjeljivanjem je metoda projektiranja na prostorno ograničenje lokalnog otkazivanja izoliranjem potencijalno oštećenog dijela mosta, što zahtijeva ispitivanje preostale konstrukcije za opterećenja koja proizlaze iz djelomičnog otkazivanja [78].

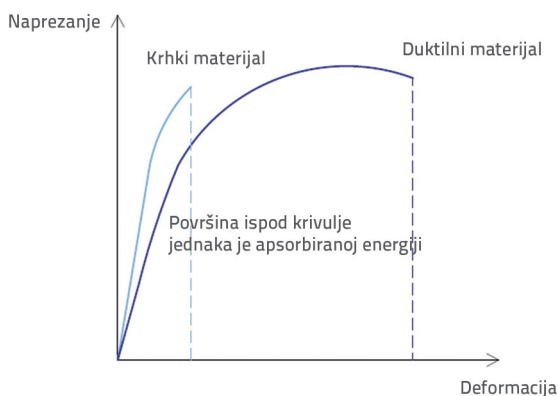
Ne smije se pretpostaviti da robusnost postoji sama po sebi već mora biti projektirana i ostvarena, ali i održavana ako želimo na nju računati tijekom cjelokupnog trajanja konstrukcije. Na primjer, dinamičko djelovanje i koncentracija sile u elementu može biti kritičnije što je materijal krhkiji, dok duktilni materijal može apsorbirati kinetičku energiju, omogućiti preraspodjelu sile, a time i smanjenje koncentracije naprezanja [70]. Pristup alternativnog opterećenja zahtijeva povećanje kontinuiteta i/ili čvrstoće, a izolacija odjeljivanjem može se postići manjim kontinuitetom ili višom čvrstoćom [78].

Knoll i Vogel [65] daju pregled elemenata robusnosti koji se mogu razmatrati pri projektiranju robusne konstrukcije, a neki od njih su: *čvrstoća, cjelovitost konstrukcije i povezanost dijelova, druga linija obrane, različiti načini prijenosa opterećenja ili zalihe konstrukcije, duktilnost nasuprot krhkog loma, žrtvujući i zaštitni sloj, uzimanje u obzir krutosti, prednost očvršćivanja plastičnom deformacijom*. Čvrstoća elemenata veća od one koja je minimalno zahtijevana mjerodavnim normama i propisima često je najekonomičnija strategija pri postizanju veće robusnosti konstrukcije, čija se važnost povećava ako je materijal konstrukcije krhkiji. Primjer ojačanja konstrukcijskog elementa mosta može se naći na lučnom Paškom mostu u Hrvatskoj, gdje su stari vitki armiranobetonski stupovi ojačani nanošenjem novog sloja betona i oblaganjem stupa čeličnim limom, kako je prikazano na slici 21. [79]. Tim je ojačanjem primijenjen element robusnosti *povećanje čvrstoće* na postojećem mostu.



Slika 21. Ojačanje postojećih AB stupova na lučnom Paškom mostu u Hrvatskoj - poprečni presjek (lijevo) te fotografija izvedbe (desno), prema [77]

Duktilnost materijala nasuprot krhkim materijalima (slika 22.), odnosno *duktilnost nasuprot krhkog loma* važan je element i pri provođenju ostalih elemenata robusnosti kao što su *druga linija obrane, osiguranje zaliha konstrukcije (redundancije)* [65], a krhko ponašanje može biti posljedica svojstava materijala, lokalnih oslabljenja, slabih spojeva, zamora ili nestabilnosti zbog vitkosti.



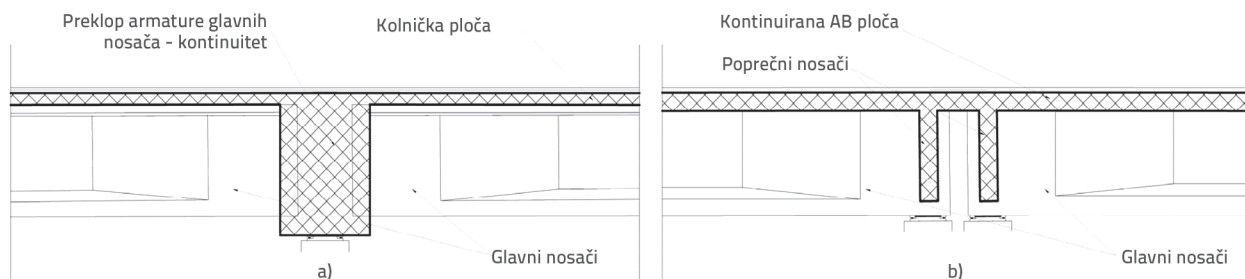
Slika 22. Krhki i duktilni materijal

Pri osiguranju *zaliha nosivosti* konstrukcija se projektira tako da ima nekoliko *različitih načina prijenosa opterećenja*. Primjer takvog

sustava je prostorna rešetka, a primjer *druge linije obrane* zaštitna je ograda uzduž ceste koja će se kod jačih udara, ako je granična otpornost savijanja elementa ograde dosegnuta, deformirati kao mehanizam uključujući određeni broj plastičnih zglobova, dok će se u slučaju duktilnih elemenata gdje su dopuštene velike deformacije kroz popuštanje materijala, promijeniti geometrija elemenata. U većini slučajeva, deformacije su obrnuto proporcionalne krutosti pa treba voditi računa o tome da poboljšanje duktilnosti u konstrukciji ne vodi *ugrožavanju krutosti*. U čeliku se čvrstoća povećava s povećanjem deformacije -

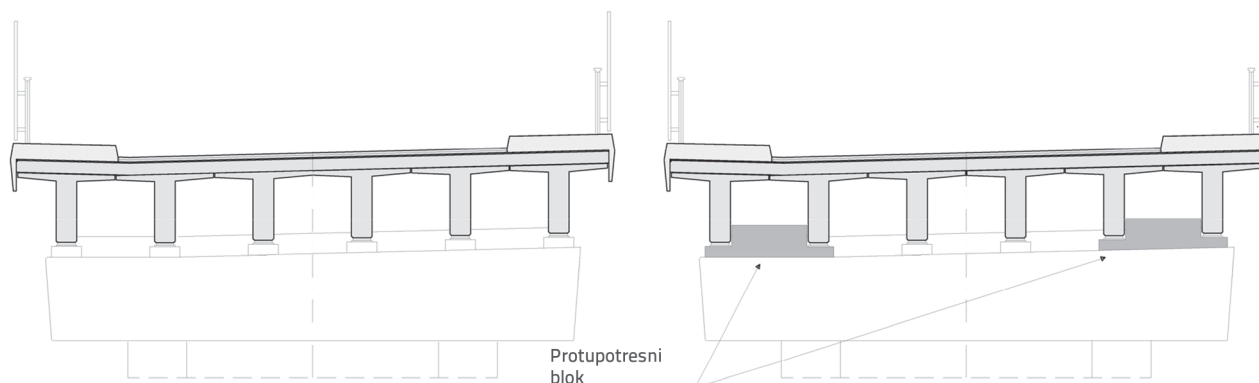
pojava koja se naziva *očvršćenje plastičnom deformacijom* te je najviše izražena kod mekih čelika. Međutim, tijekom primjene suvremenih čelika visoke čvrstoće treba biti oprezan jer vlačna čvrstoća je 10 % do najviše 15 % veća od granice popuštanja.

*Važnost cjelovitosti konstrukcije i povezanost dijelova* dokazuje se ako dijelovi konstrukcije nisu međusobno povezani, i postoji rizik da se konstrukcija raspadne zbog pomaka između pojedinih dijelova. Primjeri uspostavljanja različitih razina robusnosti cjelovitošću konstrukcije, odnosno povezanošću njenih dijelova na grednim mostovima, s jedne su strane primjer uspostavljanja punog kontinuiteta u uzdužnom smjeru mosta formiranjem kontinuiranog roštiljnog mosta (slika 23. lijevo), a s druge su strane uspostavljanje djelomičnog kontinuiteta primjenom kontinuitetne ploče kojom se formiraju sustavi slobodno oslonjenih roštiljnih mostova (slika 23. desno). Još jedan primjer elemenata robusnosti na sličnim mostovima jesu protupotresni blokovi postavljeni sa svake strane ležajeva mosta kako bi se spriječili pomaci u slučaju potresa. Kada se postave ti blokovi, rizik od sklizanja nosača mosta s ležaja je sveden na minimum, kako je prikazano na slici 24. [80]. U radu [81] prikazan je pristup seizmičke zaštite mostova dodavanjem izolatora *Žrtvujući i zaštitni uređaji* sprječavaju opasan događaj, primjerice tako da se kod stupova mostova izloženih potencijalnom udaru vozila ili plovila sagradi zasebna masivna konstrukcija koja ima



Slika 23. a) Uspostavljanje cjelovitosti konstrukcije - punim kontinuitetom kojim se formiraju kontinuirani roštiljni mostovi; b) nasuprot upotrebi kontinuitetne ploče kojom se formiraju slobodno oslonjene roštiljne konstrukcije





Slika 24. Ležajevi grednog mosta bez protupotresnih blokova za sprječavanje horizontalnih pomaka (lijevo) i s protupotresnim blokovima za sprječavanje horizontalnih pomaka (desno), prema [80]

funkciju štiti konstrukciju na mjestu potencijalnog udara, što je često ekonomičnije i prihvatljivije nego projektirati stupove dovoljno otporne na udar vozila.

Neki od elemenata robusnosti koje navode Knoll i Vogel [65] u fazi uporabe konstrukcije su uočavanje *znakova upozorenja* kao što su pukotine, odlamanja, korozija, prekomjerne vibracije, deformacije, izvijanje, te *aktivne intervencije* kojima se može kontrolirati izloženost konstrukcije djelovanjima iz okoliša, konstantni *monitoring*, *kontrola kvalitete* izvedbe, popravci i prevencija, te ugradnja *aktivnih i pasivnih uređaja* na konstrukciju radi praćenja stanja konstrukcije u uporabi.

Neki elementi robusnosti, kao što je kontinuitet potreban za formiranje alternativnih puteva opterećenja prikazan je kao diskutabilan element u radu [78], jer u nekim slučajevima može spriječiti, a u drugima promicati napredovanje progresivnog kolapsa. Ova činjenica djeluje uvjerljivo u aspektu da napredovanje progresivnog otkazivanja zahtijeva interakciju elemenata, što se može odnositi i na određeni stupanj njihove povezanosti, premda se otkazivanje zgrade Ronan Point tumači drugačije pa se progresivni slom te zgrade objašnjava nedostatkom kontinuiteta pri armiranju ploča. Integralni mostovi kod kojih su uklonjene sve prijelazne naprave i sve ležajne konstrukcije na koje otpada najveći dio troškova održavanja, što za cilj ima smanjenje rastućih troškova održavanja i povećanje njihove trajnosti, često su okarakterizirani kao robusni [82].

Pri osiguravanju robusnosti konstrukcija i implementaciji pojedinih elemenata robusnosti treba voditi računa o njihovoj optimizaciji i interakciji te da se pojedini elementi robusnosti ne moraju međusobno isključivati, štoviše, njihovo kombiniranje je ključno radi postizanja što veće robusnosti. Slijedom navedenog, pri projektiranju i osiguranju robusnosti svaku građevinu treba promatrati kao jedinstven slučaj, te za svaku pojedinačno pronaći optimalno rješenje.

## 5. Zaključak

Unatoč visokoj razini znanja, iskustva, propisanih pravila i normiranih smjernica, pri projektiranju i gradnji mostova se mogu potkrasti inženjerske pogreške, a i tijekom faze uporabnog vijeka mosta mogu se dogoditi neočekivani događaji i/ili izvanredne okolnosti koje mogu dovesti do njegovog otkazivanja. Nadalje primjeri iz prakse pokazuju da je neprikladno održavanje vrlo često problem kod postojećih mostova koji su prepušteni nekontroliranom dotrajanju, što dovodi do povećanja rizika za njihovo otkazivanje. Ovim se radom nastojao prikazati sveobuhvatni pregled:

- važnosti uloge forenzičkog inženjerstva u istragama radi određivanja uzročnopsljudičnih veza pri otkazivanju mostova,
- pregled i analiza dostupnih podataka o otkazivanju mostova s ciljem utvrđivanja učestalosti i kritičnosti pojedinih uzroka
- izvući pouke u obliku preporuka i primjera dobre prakse za projektiranje i održavanje robusnih mostova, a posebice izbjegavanje njihovog progresivnog otkazivanja.

Na osnovi sistematizacije otkazivanja mostova iz dostupne baze podataka možemo zaključiti da ljudski faktor ima bitnu ulogu u uzrocima otkazivanja. To znači da bi se odgovornim pristupom problemu i njegovom rješavanju mogla situacija bitno promijeniti nabolje te izbjeći moguće katastrofe.

Dokumentiranje svih otkazivanja s jasnim uzročno posljudičnim vezama te omogućavanje njihove dostupnosti širim stručnim i znanstvenim krugovima - kao i učenje na pogreškama, usavršavanje propisa i normi, ali i pristupa u njihovoj primjeni - trebao bi biti imperativ kako se u složenom procesu projektiranja, gradnje, uporabe i održavanja mostova iste ili slične pogreške ne bi ponavljale.

## LITERATURA

- [1] National Academy of Forensic Engineers, <https://www.nafe.org/>, 2021, 1.3. 2021.
- [2] ASCE, <https://www.asce.org/forensic-engineering/forensic-engineering/>, 1.3.2021.
- [3] Vykopalová, H., Cupal, M.: Forensic Engineering and the Importance of the Human Factor, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 116 (2014), pp. 1665-1669
- [4] Terwel, K., Ratay, R., Brühwiler, E., Wood, J., Godart, B., Dalmy, D.: An Initial Survey of Forensic Engineering Practices in Some European Countries and the USA, *Forensic Engineering*, 2012.
- [5] Carper, K.L.: Forensic engineering, Second edition, CRC Press LLC, 37 (2001) 1.
- [6] Terwel, K., Schuurman, M., Loeve, A.: Improving reliability in forensic engineering: The Delft approach, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering*, 171 (2018) 3, pp. 99-106
- [7] Bennett, J., Brosz, H., Catania, J., Ellison, K., Maher, M., Porter, D., Pupulin, D., Thompson, C., Wilkinson, J., Veerasammy, R.: *Forensic Engineering Investigations*, 2016.
- [8] Ahuja, D., Arya, B., Cohen, J., Dolhon, A., Dombrowski, L., Hancock, D., Kardon, J.B., McCoy, K.L., Morse-Fortier, L.J., Nelson, E.L., Pack, I.L., Ratay, R.T., Rossell, C., Sonenthal, L.: *Guidelines for Forensic Engineering Practice*, 2012.
- [9] Murphy, P.J., Duthie, L., Bielert, B., Charrett, D.: Australian legal guidelines for forensic engineering experts, *Australian Journal of Structural Engineering*, 11 (2020) 1, pp. 11-22, <http://dx.doi.org/10.1080/13287982.2010.11465052>
- [10] Ratay, R.T.: An overview of forensic structural engineering, *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 27 (2017) 3, <http://dx.doi.org/10.2749/101686617X14881932437176>.
- [11] Ratay, R.T.: *Forensic structural engineering handbook*, Second Edition, 2010.
- [12] ASCE: Code of Ethics Code of Ethics, 2017.
- [13] Deliđ, E., Nukić, E.: *Forenzički inženjering i upravljanje rizicima, Knjiga 2: Vođenje istražnih postupaka*, Tuzla, 2014.
- [14] Pearson, C., Delatte, N.: Collapse of the Quebec Bridge in 1907., *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20 (2006) 1, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2006\)20:1\(84\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:1(84)).
- [15] Ayub, M.: Pedestrian bridge collapse at university in Miami, Washington D.C., 2019.
- [16] Calvi, G.M., Moratti, M., O'Reilly, G.J., Scattarreggia, N., Monteiro, R., Malomo, D., Calvi, P.M., Pinho, R.: Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge, *Structural Engineering International*, 29 (2019) 2, pp. 198-217, <http://dx.doi.org/10.1080/10168664.2018.1558033>.
- [17] Burlando, M., Romanic, D., Boni, G., Lagasio, M., Parodi, A.: Investigation of the weather conditions during the collapse of the Morandi bridge in Genoa on 14 august 2018 using field observations and WRF model, *Atmosphere*, 11 (2020) 7, <http://dx.doi.org/10.3390/atmos11070724>.
- [18] Syrkov, A., Sizikov, A.: Enhancing of bridge management given failures data, *IABSE Symposium, Synergy of Culture and Civil Engineering - History and Challenges*, Wroclaw, 2020., pp. 1173-1180
- [19] Garg, R.K., Chandra, S., Kumar, A.: Analysis of bridge failures in India from 1977 to 2017, *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2020.1832539>.
- [20] Tan, J.S.; Elbaz, K.; Wang, Z.F.; Shen, J.S.; Chen, J. Lessons Learnt from Bridge Collapse: View of Sustainable Management, *Sustainability*, 12 (2020), pp. 1205, <https://doi.org/10.3390/su12031205>
- [21] Choudhury, J., Hasnat, A.: *Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms*, 2015.
- [22] Tweed, M. H.: A summary and analysis of bridge failures, 1969.
- [23] Pravilnik o kontroli projekata, (NN 32/14, 72/20), 2020.
- [24] Pravilnik o upisu u razred revidenata, (NN 50/2020), 2020.
- [25] Pravilnik o načinu provedbe stručnog nadzora građenja, obrascu, uvjetima i načinu vođenja građevinskog dnevnika te o sadržaju završnog izvješća nadzornog inženjera, (NN 111/2014, 107/2015, 020/2017, 098/2019, 121/2019), 2020.
- [26] Ruška, F., Dolaček-Alduk, Z., Dimter, S., Zagvozda, M.: Application of BIM technology in linear construction projects, 5<sup>th</sup> International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2018, Road and Rail Infrastructure V, (ed. Lakusic, S.), pp. 1469-1474, 17-19 May 2018, Zadar, Croatia, <http://dx.doi.org/10.5592/co/cetra.2018.917>.
- [27] HKIG: Opće smjernice za BIM pristup u graditeljstvu, Naklada Zadro, 2017.
- [28] Hunt, C.A.: The Benefits of Using Building Information Modeling in Structural Engineering, 2013., pp. 31-37
- [29] Imam, B.M., Chryssanthopoulos, M.K.: Causes and consequences of metallic bridge failures, *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 22 (2012) 1, pp. 93-98, <http://dx.doi.org/10.2749/101686612X13216060213437>.
- [30] Giordano, P.F., Prendergast, L.J., Limongelli, M.P.: A framework for assessing the value of information for health monitoring of scoured bridges, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10 (2020) 3, pp. 485-496, <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-020-00398-0>.
- [31] Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija, HRN EN 1990:2011; (EN 1990:2002 + A1:2005+ A1:2005/AC:2010)
- [32] Arioli, G., Gazzola, F.: Old and new explanations of the Tacoma Narrows Bridge collapse, *Atti XXI Congresso AIMETA*, Torino, 2013., p. 10
- [33] Green, D., Unruh, W.G.: The failure of the Tacoma Bridge: A physical model, *American Journal of Physics*, 74 (2006) 8, pp. 706-716, <http://dx.doi.org/10.1119/1.2201854>
- [34] Olson D.W. et al.: The Tacoma Narrows Bridge collapse, *Physics today*, 68 (2016), pp. 64-65
- [35] Peroš, B., Boko, I., Šimunović, T.: Analiza djelovanja vjetra na Dubrovački most, *GRAĐEVINAR*, 57 (2005) 2, pp. 87-94
- [36] Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-4: Opća djelovanja - Djelovanja vjetra, HRN EN 1991-1-4:2012, (EN 1991-1-4:2005+AC:2010+A1:2010)
- [37] Setunge, S.: Failure mechanisms of bridge structures under natural hazards, 2018.
- [38] Chen, W.F., Duan, L.: *Earthquake Damage to Bridges*, 2003.

- [39] Kulicki, J.M.: Learning from failures and mistakes - their influence on U.S. bridge codes and practice, XXV Konferencija Naukovo-techniczna, 2011.
- [40] Lee, G.C., Mohan, S.B., Huang, C., Fard, B.N.: A study of U.S. bridge failures (1980-2012), Technical Report MCEER - 13-0008, 2013.
- [41] Prendergast, L.J., Limongelli, M.P., Ademovic, N., Anžlin, A., Gavin, K., Zanini, M.: Structural health monitoring for performance assessment of bridges under flooding and seismic actions, *Structural Engineering International*, 28 (2018) 3, pp. 296-307, <http://dx.doi.org/10.1080/10168664.2018.1472534>.
- [42] Mujkanovic, N., Vlašić, A., Šavor, Z.: Sanacija željezničkog mosta Sava Jakuševac, Dani prometnica 2012 - Građenje prometne infrastrukture (ed. Lakusic, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2012, pp. 85-117
- [43] Schumacher, J.: Assessment of Bridge-Structures Under Fired Impact: A Case Study Approach, 2016.
- [44] Godart, B., Berthelley, J., Lucas, J.P.: Diagnosis of a large steel bridge close to collapse during a fire, *Engineering for Progress, Nature and People*, 2014., pp. 1031-1038, <http://dx.doi.org/10.2749/222137814814067293>.
- [45] Giuliani, L., Crosti, C., Gentili, F.: Vulnerability of bridges to fire, *Bridge Maintenance, Safety Management, Resilience and Sustainability - Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 2012., pp. 1565-1572, <http://dx.doi.org/10.1201/b12352-225>.
- [46] Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - Dio 1-7: Opća djelovanja - Izvanredna djelovanja, HRN EN 1991-1-7:2012, (EN 1991-1-7:2006+AC:2010)
- [47] Skokandić, D., Mandić Ivanković, A.: Value of additional traffic data in the context of bridge service-life management, *Structure, and Infrastructure Engineering*, 2020, 10.1080/15732479.2020.1857795
- [48] Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije - 2.dio: Prometna opterećenja mostova, HRN EN 1991-2:2012/NA:2012, (EN 1991-2:2003+AC:2010)
- [49] Skokandić, D., Mandić Ivanković, A., Žnidarič, A., Srbić, M.: Modelling of traffic load effects in the assessment of existing road bridges, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 12, pp. 1153-1165, <https://doi.org/10.14256/JCE.2609.2019>
- [50] World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, New York, USA, 2019.
- [51] Gross, M.: A planet with two billion cars, *Current Biology*, 26 (2016) 8, pp. R307-R310, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.019>.
- [52] Luechinger, P., Fischer, J.: JRC New European Technical Rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures, Policy Framework, Existing regulations and standards, Prospect for CEN Guidance, 2015.
- [53] Liang, Y., Xiong, F.: Study on Fatigue Load Model of Highway Bridges: A Case in Southeast China, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 1, pp. 21-33, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2664.2019>
- [54] Zakon o gradnji (NN 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), 2019.
- [55] Nasr, A., Björnsson, I., Honfi, D., Larsson Ivanov, O., Johansson, J., Kjellström, E.: A review of the potential impacts of climate change on the safety and performance of bridges, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2019., <http://dx.doi.org/10.1080/23789689.2019.1593003>.
- [56] Brischke, C., Meyer-Veltrup, L.: Wood Protection by Design - Concepts for Durable Timber Bridges, 11<sup>th</sup> Meeting of the Northern European Network on Wood Science and Engineering, Poznan, Poland, 2016.
- [57] Bjegović, D., Štirmer, N.: Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2015., p. 999
- [58] Kušter Marič, M., Ivanković, A.M., Vlašić, A., Bleiziffer, J., Srbić, M., Skokandić, D.: Assessment of reinforcement corrosion and concrete damage on bridges using non-destructive testing, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 10, pp. 843-862, <https://doi.org/10.14256/JCE.2724.2019>
- [59] Zambon, I., Vidovic, A., Strauss, A., Matos, J.: Use of chloride ingress model for condition assessment in bridge management, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 5, pp. 359-373, <https://doi.org/10.14256/JCE.2411.2018>
- [60] FitzSimons, N.: Historical Perspective of Failures of Civil Engineering Works, 1986., pp. 38-45
- [61] O'Connor, A., Enevoldsen, I.: Probability-based assessment of highway bridges according to the new Danish guideline, *Structure and Infrastructure Engineering*, 5 (2009) 2, pp. 157-168
- [62] Baker, J.W., Schubert, M., Faber, M.H.: On the assessment of robustness, *Structural Safety*, 30 (2008) 3, pp. 253-267, <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2006.11.004>.
- [63] Starossek, U., Wolff, M.: Progressive Collapse: Design Strategies, 2005., pp. 9-16, <http://dx.doi.org/10.2749/222137805796270829>.
- [64] Brett, C., Lu, Y.: Assessment of robustness of structures: Current state of research, *Frontier of Structural and Civil Engineering*, 7 (2013) 4, pp. 356-368, <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-013-0220-z>.
- [65] Knoll, F., Vogel, T.: Design for Robustness, IABSE - IVBH ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2009.
- [66] UFC 4-010-01: DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, Unified Facilities Criteria, 12 (2018), p. 91, <http://www.wbdg.org/ffc/dod>
- [67] ASCE: Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE Standard, 2005.
- [68] General Services Administration (GSA): GSA Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Projects, 2003.
- [69] Starossek, U., Haberland, M.: Disproportionate Collapse: Terminology and Procedures, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24 (2010) 6, pp. 519-528, [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000138](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000138).
- [70] Starossek, U.: Typology of progressive collapse, *Engineering Structures*, 29 (2007), pp. 2302-2307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.025>.
- [71] Aoki, Y.: Analysis of the Performance of Cable-Stayed Bridges under Extreme Events, 2014.
- [72] Seyed Khoei, A., Akbari, R., Maalek, S., Gharighoran, A.: Assessment of Design and Retrofitting Solutions on the Progressive Collapse of Hongqi Bridge, Shock and Vibration, 2020, <http://dx.doi.org/10.1155/2020/4932721>.
- [73] Bi, K., Hao, H.: Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: A multi-span simply-supported Bridge, Australia Earthquake Engineering Society Conference, 2013., <http://www.aees.org.au/wp-content/uploads/2015/06/15-Bi-Kaiming-Progressive.pdf>.
- [74] Davis-Mcdaniel, C.: Fault-Tree Model for Bridge Collapse Risk Analysis, 2011., p. 85
- [75] Čizmar, D., Rajčić, V., Kirkegaard, P.H., Sorensen, J.D.: Probabilistic analysis of structural robustness, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 5, pp. 431-439

- [76] Duncan, S., Callaway, M., Newman, E.J., Steven, H., Duncan, J.W.: Network Robustness and Fragility: Percolation on Random Graphs, *Physical review letters*, 85 (2000), pp. 5468, 85, <http://dx.doi.org/doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.5468>.
- [77] JCSS: Probabilistic Model Code - Part 1, JCSS, 2001, p. 65
- [78] Starossek, U.: Progressive collapse of bridges-Aspects of analysis and design, *International Symposium on Sea-Crossing Long-Span Bridges*, Mokpo, Korea, 2006.
- [79] Šavor, Z., Mujkanovic, N., Hrelja Kovacevic, G., Bleiziffer, J.: Reconstruction of the Pag Bridge, *Chinese-Croatian Joint Colloquium - Long Arch Bridges*, SECON HDGK, 2008, pp. 241-252
- [80] Hrelja Kovačević, G., Mandić Ivanković, A.: Assessing seismic vulnerability of existing bridges using fragility curves, 6<sup>th</sup> Symposium on Doctoral Studies in Civil Engineering, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2020., pp. 163-174, <http://dx.doi.org/doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2020.13>.
- [81] Misini, M., Ristic, J., Ristic, D., Guri, Z., Pllana, N.: Seismic upgrading of isolated bridges with SF-ED devices: Analytical study validated by shaking table testing, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 4, pp. 255-272, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2274.2017>
- [82] Šavor, K.: Integral bridges, *GRAĐEVINAR*, 55 (2003) 9, pp. 519-525