

RUŠENJE MOSTOVA

BRIDGE COLLAPSE

Kaja Jagarinec*, Ivana Štimac Grandić*

Sažetak

Mostovi su konstrukcije kojima se ostvaruje visinsko svladavanje postojećih prepreka, a njihova gradnja seže daleko u povijest. Prvi mostovi bili su pješački, a često je srušeno deblo preko prepreke predstavljalo konstrukciju mosta. Gradnja mostova kroz povijest razvijala se sporo i iskustveno, uz brojne greške, koje su kao posljedicu imale urušavanje cijelog mosta ili dijela njegove konstrukcije. Rušenje mosta može biti uzrokovano ljudskim ili prirodnim faktorom. Ljudski faktor obuhvaća greške u proračunu, greške tijekom gradnje, neadekvatno održavanje, i sl. Prirodne pojave obuhvaćaju poplave, potrese, tornada, i sl. U ovome radu predstavljena je statistika rušenja mostova u ovisnosti o lokaciji mosta, godini gradnje i godinama uporabe, vrsti konstrukcije i materijalu te u ovisnosti o uzrocima rušenja na uzorku od 60 mostova.

Ključne riječi: most, rušenje, ljudski faktor, prirodni faktor

Abstract

A bridge is a structure built over existing obstacles. Its construction goes way back to history. The first bridges were built of wood in the form of footbridges. Bridge structures evolved slowly and experientially throughout history and has encountered numerous failures that led to the collapse of the entire bridge or part of its structure. Bridge collapse can be caused by human or natural factors. Human factors include human errors such as errors in design and construction, inadequate maintenance, etc. Natural phenomena include floods, earthquakes, tornadoes, etc. This paper presents the statistics of bridge collapses depending on the location of the bridge, the year of construction and service life duration, the type of construction and material, and the causes of collapse based on a sample of 60 bridges.

Key words: bridge, collapse, human factor, natural factor

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka
E-mail: kjagarinec@student.uniri.hr; istimac@grad.uniri.hr

1. Uvod

Najjednostavnija definicija mosta kao građevine kojom se ostvaruje prijelaz preko postojeće prepreke pokazuje kako njihova gradnja seže daleko u povijest. Prvi mostovi građeni su od priručnih, odnosno dostupnih materijala kao što su kamen i drvo, a građeni su prvotno u svrhu pješačkog prijelaza.

Razvojem prijevoznih sredstava, od korištenja životinja, zaprežnih kola, kočija, zatim željezničkog prometa i cestovnog prometa zahtjevi za gradnju prometne infrastrukture uvelike se mijenjaju. Pojavom novih oblika prometa teži se izgradnji dužih mostova s konstrukcijama većih raspona, duljim vijekom trajanja, izdržljivijim i otpornijim materijalima te, u konačnici, bržom gradnjom. Razvoj gradnje mostova kroz povijest tekao je sporo, a zasnivao se na iskustvu. Takav razvoj gradnje doveo je do brojnih grešaka i katastrofa tijekom gradnje i/ili tijekom uporabe mosta. Usprikoš materijalnim štetama, novčanim gubitcima i ljudskim žrtvama te su katastrofe na buduće gradnje mostova imale pozitivan utjecaj u obliku novih saznanja o ponašanju konstrukcije.

U današnje vrijeme, gradnja mostova, uz velike duljine, širine i raspone konstrukcije, bržu gradnju, otpornije i izdržljivije materijale te što dulji vijek trajanja konstrukcije, zahtjeva još i prenošenje velikih opterećenja, skladnost konstrukcije s postojećom okolinom te ekonomičnost. Suvremena gradnja se od tradicijske najviše razlikuje po upotrebi novih materijala i metoda gradnje te u korištenju novih strojeva i predgotovljenih elemenata koji olakšavaju i ubrzavaju gradnju.

Mostovi su zbog svoje kompleksnosti i zahtjevnosti gradnje oduvijek fascinirali ljude i vremenom su postali simbol povezivanja mjesta, gradova i država, te metafora ljudske povezanosti, trajnosti i prolaznosti vremena.

Uz prethodno nabrojano, mostovi su jedna od najvažnijih inženjerskih građevina prometne infrastrukture [1]. Svako rušenje mosta ostavlja za sobom trajne posljedice, bilo ekonomske, bilo sociološke, pa čak i onda kada za posljedicu nema ljudska stradanja.

2. Rušenja mostova

Oštećenja i rušenja mostova jedan su od najvećih problema u kontekstu infrastrukturnih građevina u svijetu i često uzrokuju značajne ekonomske troškove i gubitke. Tijekom posljednjih desetljeća inženjeri su shvatili važnost prikupljanja i arhiviranja informacija o konstrukcijskim pogreškama i rušenjima mostova. Razmatranje posljedica rušenja dijela ili cijelog mosta ključno je u projektiranju i ocjeni stanja konstrukcije, kao i u vrednovanju njene robusnosti [2].

Rušenjem mosta smatramo rušenje cijelog mosta ili dijela njegove konstrukcije na način da je onemogućeno sigurno korištenje mosta, a događa se od kada je započela i sama gradnja mostova. Gradnja mostova, kao i gradnja ostalih građevinskih konstrukcija, kroz povijest se razvijala iskustveno, a većina tehničkog znanja koje posjedujemo danas temelji se na pogreškama i saznanjima kroz povijest. Svako rušenje mosta, kao i gradnja, ima svoje jedinstvene značajke i čimbenike te ih je teško kategorizirati zbog toga što najčešće postoji više od jednog uzroka rušenja. Glavni čimbenici rušenja mostova mogu se podijeliti na prirodne i ljudske. Kao što sam naziv čimbenika govori, prirodni su posljedica prirodnih djelovanja, dok ljudski čimbenici obuhvaćaju ljudske greške tijekom projektiranja, građenja ili uporabe mosta. Podkategorizacija ova dva uzročnika rušenja mostova je subjektivna i ovisi o samom promatraču, njegovim interesima, ciljanom ili općem promatranju te dostupnosti literature.

Problem kategorizacije čimbenika rušenja može se uvidjeti na primjeru mosta kojemu je neki dio konstrukcije nepropisno projektiran ili izveden suprotno projektu, a taj dio zadovoljava trenutna prometna i druga opterećenja te djelovanja kojima je izložen. Tijekom uporabe, pri djelovanju opterećenja većeg intenziteta od uobičajenog uporabnog opterećenja ili pri djelovanju izvanrednog djelovanja (npr. potresa), upravo taj dio, zbog greške prilikom projektiranja ili izvođenja, može otkazati i prouzročiti rušenje dijela ili cjelokupne konstrukcije. U tom slučaju, prirodni čimbenik nije jedini uzročnik rušenja mosta već je uzročno posljedična veza krive izvedbe ili projektiranja. Usprkos tome, kao razlog rušenja često se navodi upravo onaj uzrok koji je zadnji djelovao na konstrukciju jer je ponekad teško ustanoviti da je postojala greška u postupku projektiranja ili izgradnje.

U svijetu su objavljeni znanstveni članci u kojima se na određenom uzorku analiziraju uzroci rušenja te utjecaji unutarnjih obilježja srušenih konstrukcija [3-8], kao i članci koji se bave određivanjem razloga rušenja pojedinih mostova [9,10].

Premda se u literaturi mogu naći podatci o mnogo većem broju srušenih mostova (prema [5] procjenjuje se da u SAD ima godišnje između 87 i 222 rušenja mostova, a u državi New York je zabilježeno 103 rušenja od 1987. do 2011. godine, dok se u [7] navodi 418 rušenja između 2009. i 2019. godine u Kini), u ovom je radu izabrano 60 srušenih mostova.

Metodologija formiranja uzorka srušenih mostova koji su analizirani u ovom radu temeljila se na činjenici da su za svaki srušeni most trebali biti dostupni svi sljedeći podatci: država i kontinent na kojem se most nalazio, godina gradnje i godina rušenja, materijal od kojeg je izgrađena nosiva konstrukcija, vrsta glavnog nosivog sklopa, tip nosive konstrukcije te razlog rušenja [11].

Ovakav potpuni skup podataka omogućit će, nakon što se ovim radom utvrdi relevantnost uzorka, određivanje korelacije prikupljenih podataka u

uzorku (primjerice korelacija razloga rušenja s lokacijom mosta, korelacija razloga rušenja s materijalom, vrstom glavnog nosivog sklopa i tip nosive konstrukcije, i sl.). Ovakve korelacije mogu dati bitan doprinos određivanju kritičnih kombinacija karakteristika mosta i prirodnih i ljudskih čimbenika koji dovode do rušenja mostova.

2.1. Prirodni čimbenici

Rušenje mosta pod utjecajem prirodnih čimbenika često je katastrofalno, dolazi do urušavanja dijela ili cijele konstrukcije, a ovisi o opsegu prirodne pojave. Svaka prirodna pojava može uzrokovati velike štete na užem ili širem području. U nastavku su navedene najčešće prirodne pojave koje uzrokuju rušenje mostova.

Potres kao prirodna nepogoda dovodi do vertikalnih i horizontalnih kretanja tla koja mogu uzrokovati oštećenja ili rušenje građevina. Kod mostova, prilikom potresa najčešća se oštećenja javljaju u vidu sloma stupa mosta, klizanja nosača ili cijele rasponske konstrukcije u poprečnom ili uzdužnom smjeru, pomicanja ili slijeganja tla, što smanjuje nosivost temeljne konstrukcije [3].

Vjetar uzrokuje statičke i dinamičke sile koje su glavni izazov u projektiranju mostova, a posebno mostova velikih raspona. Aerodinamičke vibracije obično uzrokuju lepršanje, udaranje i oscilacije izazvane vrtlogom, a one dovode do pomaka i naprezanja koji mogu premašiti projektirana naprezanja i uzrokovati urušavanje. Najpoznatije rušenje mosta uzrokovano djelovanjem vjetra je most Tacoma Narrows. Nakon njegova urušavanja provedena su brojna istraživanja kojima je ustanovljeno da je glavni razlog rušenja mosta njegova loša aerodinamika [3,12]. Tornado je intenzivan zračni vrtlog koji ima oblik lijevka ili cijevi. Pruža se vertikalno ispod oblaka sve do površine tla. Cijev može biti promjera do 1000 m, uzduž osi nastaje jaki i nagli pad tlaka zraka, a brzina vjetra može premašiti i 500 km/h [13].

Istraživanja pokazuju iznenađujući broj mostova uništenih djelovanjem vode, uglavnom uslijed poplava i podlokavanja [8]. Poplave mogu odmah srušiti most ili ga učiniti osjetljivim na druge uzroke rušenja. Podlokavanje je pojava u kojoj se razina korita oko temelja mosta snižava pod utjecajem vodenog toka, a događa se zbog povećanja brzine protoka ili dugotrajne erozije korita. Uzrokuje izloženost temelja mosta, pa može doći do savijanja ili lokalnog pomicanja temelja, čime se značajno smanjuje nosivost mosta [3]. Osim poplava i podlokavanja kao glavnih uzroka rušenja mosta uslijed djelovanja vode, na vodotocima koji se zimi zaleđuju dolazi i do mogućnosti udara leda u stupove ili rasponsku konstrukciju mosta.

Klizište je dio padine na kojem je zbog poremećaja stabilnosti došlo do klizanja, odnosno kretanja površinskog sloja tla. Najčešći uzroci klizanja tla su promjena razine podzemne vode, vlažnosti, temperature, tektonski

poremećaji i potresi, te neprikladni zahvati na tlu (krčenje vegetacije) [14]. Odrhon materijala uzrokuje udare u stupove i/ili upornjake mostova, pomicanje temelja mosta te dovodi do znatnih oštećenja, a može uzrokovati i rušenje mosta [3].

2.2. Ljudski čimbenici

Analiza rušenja mostova uzrokovanih ljudskim čimbenicima utjecala je pozitivno na današnja saznanja i razvoj propisa za projektiranje, izvođenje i održavanje mostova. Greške nastale kao posljedica ljudskih čimbenika mogu prouzročiti rušenje dijela konstrukcije ili pak cijele konstrukcije ovisno o veličini pogreške. U nastavku su izdvojeni najčešći ljudski čimbenici koji dovode do rušenja mostova.

Projektiranje svake građevine zahtjeva detaljnu analizu svih čimbenika koji utječu na most u izgradnji i uporabi, a podrazumijeva pravilnu primjenu priznate i u vrijeme projektiranja važeće tehničke regulative (normi, propisa i sl.) i adekvatno izvođenje radova uz nadzor. Veliku ulogu ima i izbor materijala i vrsta glavnog nosivog sustava ovisno o okolišu u kojem se most nalazi te veličini opterećenja koju konstrukcija mora prenijeti. Nije rijetko da se prilikom gradnje štedi na materijalu, što može uzrokovati nedostatnu nosivost konstrukcije. Nepravilno projektiranje ili nesavjesno projektiranje i izvođenje može dovesti do urušavanja konstrukcije, a posljedično i do materijalnih gubitaka i ljudskih žrtava [3].

Preopterećenje mosta može se javiti zbog pogreške kod projektiranja, prenamjene mosta, povećanja prometnog opterećenja u odnosu na projektirano te uslijed preopterećenih vozila (kamiona) koji prolaze mostom. Preopterećenje se može javiti i u obliku zamora, što skraćuje vijek trajanja mosta, a vremenom može uzrokovati i rušenje. Kod nekih ekstremnih slučajeva dovoljan je jedan preopterećeni kamion da premaši nosivost mosta i uzrokuje njegovo rušenje [3].

Udar na mostove prvenstveno se promatra kao udar plovila ili vozila u stupove ili upornjake mosta. Oštećenjem potpora mosta smanjuje se nosivost, što može dovesti do rušenja dijela ili cijelog mosta. Vozilo ili plovilo može udariti i u rasponsku konstrukciju, čime je može oštetiti ili srušiti, no takva rušenja su izuzetno rijetka [3].

Tijekom uporabe, mostovi su izloženi raznim opterećenjima i utjecaju okoliša, čime se pogoršava njihovo stanje i dovodi do propadanja. Neadekvatno održavanje i nedostatak pregleda mosta u uporabi mogu dovesti do oštećenja koja uzrokuju rušenje dijela ili cijelog mosta [3]. Kao nedavni primjer može se navesti most Polcevera u Genovi, koji se srušio 2018. godine usmrтивši 43 osobe. Razlozi rušenja bili su greške u projektiranju, greške prilikom izgradnje i neadekvatno održavanje. Kao

glavni razlog uzima se neadekvatno održavanje jer su greške u izgradnji i projektiranju ispravljane kroz nekoliko postupaka sanacije [9,10].

Požar na mostovima javlja se kao posljedica sudara vozila ili nesreća tijekom gradnje. Brzi porast temperature stvara velike temperaturne promjene u materijalu, koje dovode do pucanja betona i izvijanja čeličnih elemenata. Požar doprinosi smanjenju čvrstoće i krutosti materijala, čime se smanjenje nosivost dijelova konstrukcije i uzrokuje djelomično ili potpuno urušavanje mosta [3].

Rat kao oružani sukob između dvije ili više država ili saveza ima za posljedicu brojne ljudske žrtve, razaranje gradova i građevina, pa samim time i mostova [15]. U Hrvatskoj postoje brojni primjeri rušenja mostova tijekom ratnih zbivanja u dva svjetska rata i za vrijeme Domovinskog rata, od kojih je najpoznatiji rušenje Masleničkog mosta, koje je uzrokovalo prekid veze sjevera i juga Hrvatske.

Sinkronizirano hodanje više pješaka, trčanje ili stupanje mostom može izazvati nekontrolirano vibriranje mosta, čija posljedica može biti rušenje mosta. Nakon urušavanja mosta Broughton u Engleskoj prilikom marširanja vojske preko mosta, 1831. godine naređeno je engleskoj vojsci da se preko mosta kreće normalnim hodom. Tijekom istrage utvrđeno je otkazivanje vijka zbog lošeg kovanja i izvedbe te bi do rušenja došlo bez obzira na stupanje, no ono je ubrzalo proces [16]. Dva dana nakon otvorenja mosta Millenium Bridge u Londonu, koje je bilo karakterizirano velikim horizontalnim vibracijama mosta uslijed sinkroniziranog kretanja velikog broja pješaka mostom, most je zatvoren za promet zbog brige vlasnika da ne dođe do njegova rušenja. Most je ponovno otvoren za promet tek nakon dvije godine tijekom kojih je provedena sanacija i ugradnja amortizera [17].

3. Statistika rušenja mostova na uzorku

Mostovi u uzorku odabrani su na način da je bilo moguće za svaki most pronaći sljedeće podatke: kontinent na kojem se nalaze, država u kojoj se nalaze, godina izgradnje, godina rušenja, materijal od kojeg su izgrađeni, vrsta glavnog nosivog sklopa, tip nosive konstrukcije te uzrok rušenja [11].

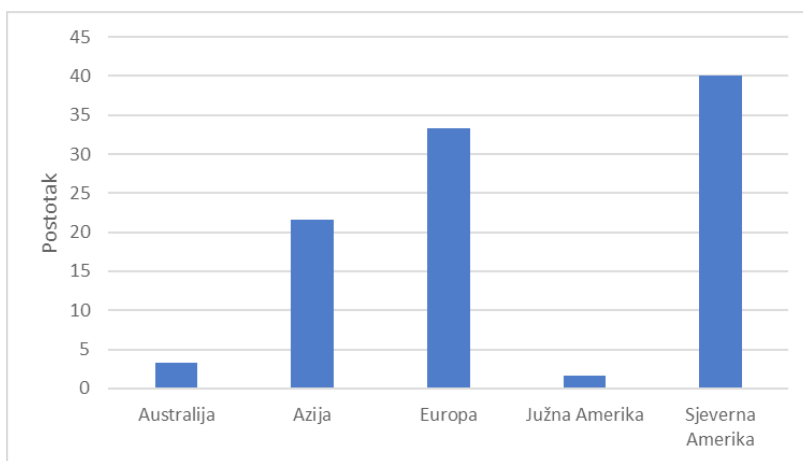
Izvori podataka o srušenim mostovima su bili različiti, pretežito dostupni na raznim internetskim portalima (dnevne novine, tjednici, specijalizirane stranice o konstrukcijama u građevinarstvu, i sl.) te znanstveni i stručni članci u časopisima. Za većinu mostova u uzorku korišteno je nekoliko izvora da se potvrdi autentičnost podataka.

Statistička obrada rađena je na način da se unutar analizirane grupe podataka (npr. podatci o državi u kojoj je izgrađen) prikažu postotni udjeli mostova izgrađenih u pojedinoj državi u odnosu na ukupni broj mostova u uzorku. Ista metoda primijenjena je na sve analizirane grupe podataka.

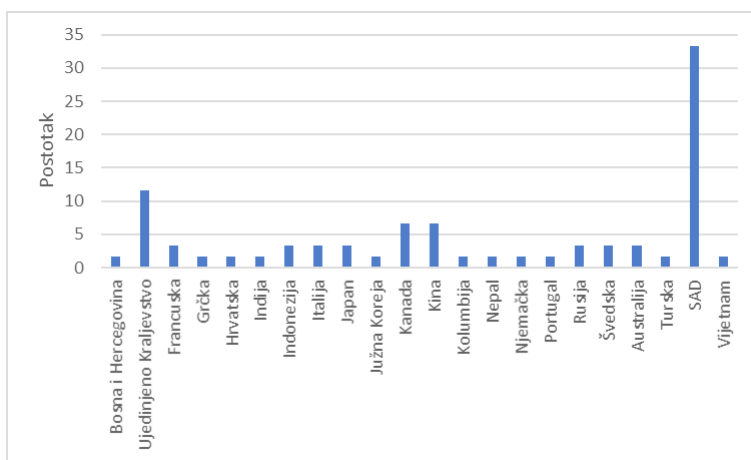
3.1. Kontinent i država u kojoj su izgrađeni

Iz Slike 1 može se vidjeti da se rušenja događaju na svim kontinentima (osim Antarktike, koja je gotovo nenaseljena i infrastrukturno slabo razvijena). Srušenih mostova ima u vrlo razvijenim zemljama poput Japana, SAD, Njemačke i sl., kao i u slabije razvijenim zemljama poput Nepala, Kolumbije i sl.

S obzirom na prikupljene podatke (Slike 1 i 2) vidljivo je kako se najveći broj srušenih mostova nalazi u Sjevernoj Americi te slijedom toga i u državi SAD, a razlog tome je dostupnost svih podataka o srušenim mostovima i uzrocima rušenja potrebnima za analizu u ovom radu.



Slika 1. Rušenja u ovisnosti o kontinentu na kojem se most nalazio



Slika 2. Rušenja u ovisnosti o državi u kojoj se most nalazio

Veliki broj radova koji sadrže statističke podatke o rušenjima mostova obrađuje samo pojedine zemlje, najčešće SAD i Kinu [5,6,18,19]. U radu [20], u kojem su prikupljeni i analizirani podatci o velikim rušenjima mostova od 1997. do 2009. godine, geografska podjela lokacija mostova dana je za tri područja: SAD i Kanada 33 %, Europa 18 % te ostatak svijeta 47 %.

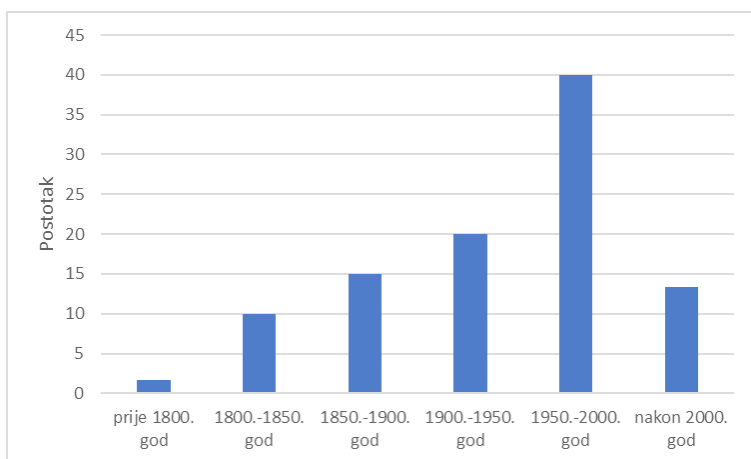
3.2. Godine izgradnje i godine uporabe

Godine izgradnje grupirane su tako da se prikazuju mostovi izgrađeni prije 1800. godine, između 1800. i 1850. godine, 1850. i 1900. godine, 1950. i 2000. godine te nakon 2000. godine.

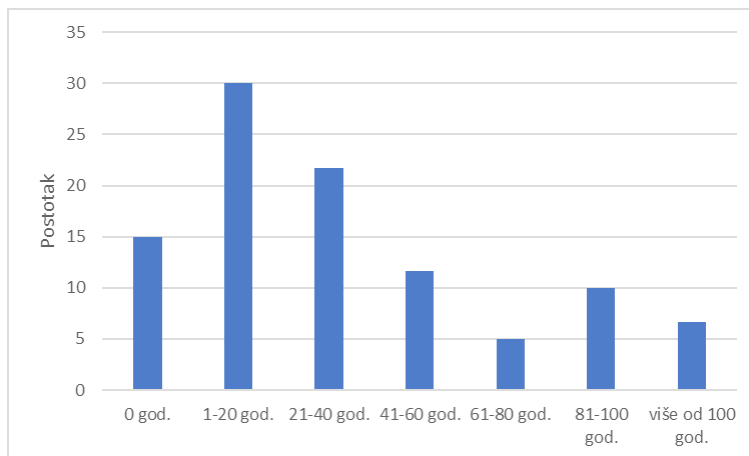
Prema prikupljenim i obrađenim podacima (Slika 3) može se vidjeti da je većina srušenih mostova izgrađena tijekom 20. stoljeća, odnosno da za te mostove, s obzirom da su izgrađeni u bliskoj prošlosti, imamo najviše informacija. Najstariji most u ovoj skupini je Stari most u Mostaru, koji datira iz 1566. godine.

Podjela prema vremenu uporabe izrađena je na način da se 0 godina odnosi na srušene mostove za vrijeme gradnje, a nadalje su prikazani podatci za 1 – 20 godina, 21 – 40 godina, 41 – 60 godina, 61 – 80 godina, 81 – 100 godina i više od 100 godina uporabe (Slika 4).

Vidljivo je kako je najviše mostova u ovom uzorku trajalo svega dvadesetak godina (30 %), rušenja u izgradnji obuhvaćaju 15 % mostova u uzorku, rušenja između 21 i 40 godine uporabe obuhvaćaju 21 % mostova u uzorku, a mali udio srušenih mostova uporabe premašuje 80 godina uporabe (22 %).



Slika 3. Rušenja u ovisnosti o godini izgradnje



Slika 4. Rušenja u ovisnosti o godinama uporabe

Statistika određena na odabranom uzorku ne odstupa bitno od u literaturi pronađenih podataka. Tako se u literaturi koja analizira srušene mostove u Kini u razdoblju od 2009. do 2019. godine [7] navodi da je 67 % srušenih mostova bilo starosti do 20 godina (čak 30 % u prvih 10 godina), 16,7 % između 20 i 30 godina, a iznad 40 godina samo nešto više od 6 % mostova, dok disertacija koja obrađuje rušenja u SAD-u u razdoblju od 1990. do 2008. godine [5] navodi 11 % rušenja u razdoblju uporabe do 20 godina, 33 % od 21 – 40 godina, 22 % od 51 – 60 godina te svega 34 % nakon 61 godine.

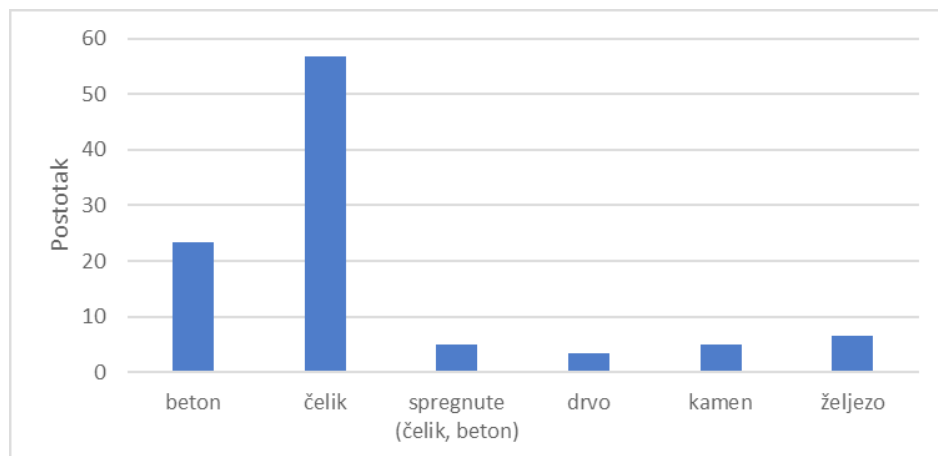
To ukazuje na činjenicu da se greške u koncepciji projektnog rješenja, proračunu ili građenju u pravilu očituju kao konstrukcijski nedostaci koji mogu uzrokovati rušenje najčešće u prvim godinama uporabe.

3.3. Materijal

Ova podjela dijeli mostove na one izgrađene od kamena, željeza, drva, čelika, armiranog i prednapetog betona (AB i PB), te spregnute mostove od čelika i betona. Prema prikupljenim podacima, najviše mostova građeno je u prošlom stoljeću, kada popularnost stječe čelik kao ekonomični materijal, odnosno materijal dobrog odnosa vlastite težine i nosivosti. Za njim (posebno u SAD) nešto zaostaje korištenje armiranog i prednapetog betona. Stoga je za očekivati, a što potvrđuje i Slika 5, da je najviše srušenih mostova čeličnih, a zatim betonskih.

U analiziranom uzorku srušenih mostova u SAD u literaturi [6] 71 % je čeličnih, 15 % betonskih, a 13 % drvenih. Slični podatci mogu se pronaći i u literaturi [21] u kojoj se navodi da je više od 70 % srušenih mostova izgrađeno od čelika ili betona, dok su manje od 30 % mostovi izrađeni od

drugih materijala. Vidljivo je da je udio srušenih mostova prema materijalu usporediv s uzorkom odabranim u ovom radu.

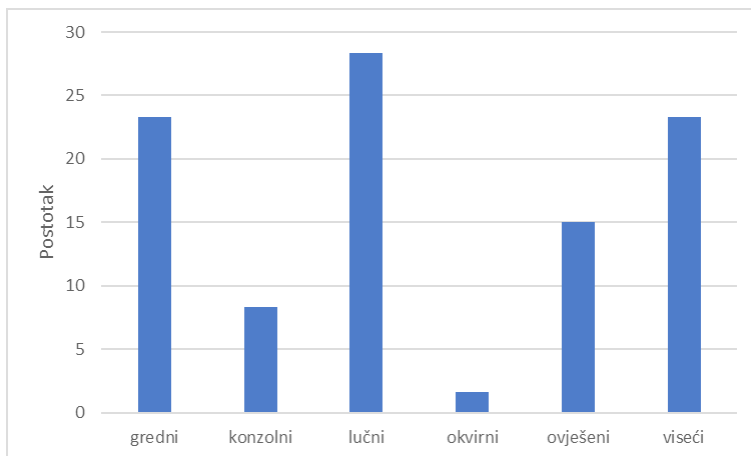


Slika 5. Rušenja u ovisnosti o materijalu

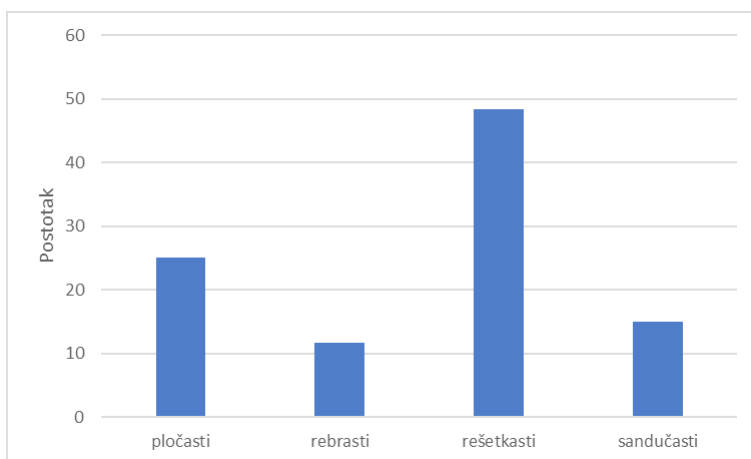
3.4. Glavni nosivi sklop i tip rasponske konstrukcije

Glavni nosivi sklop definira se kao gredni, lučni, okvirni, viseći, ovješeni i konzolni. Prema Slici 6 vidljivo je da je najmanje rušenja okvirnih sustava, što možemo pripisati njihovoj višestrukoj statičkoj neodređenosti. Relativno je mali broj srušenih konzolnih mostova u analiziranom uzorku, no to se može objasniti činjenicom da se takvi sustavi malo grade jer je već prije nekoliko desetljeća uočena njihova manjkavost statičke neodređenosti. Viseći, gredni i lučni mostovi imaju sličan udio među srušenim mostovima (23 – 27 %) dok ovješeni imaju udio od 15 %.

Podjela prema tipu rasponske konstrukcije razvrstana je na pločaste, rebraste, sandučaste i rešetkaste nosive konstrukcije. Najviše srušenih mostova u uzorku ima rešetkastu rasponsku konstrukciju (gotovo 50 %, Slika 6). S obzirom da je većina mostova u uzorku građena od čelika, možemo zaključiti da će u ovoj kategoriji najviše prevladavati rešetkasti mostovi.



Slika 6. Rušenja u ovisnosti o glavnom nosivom sklopu

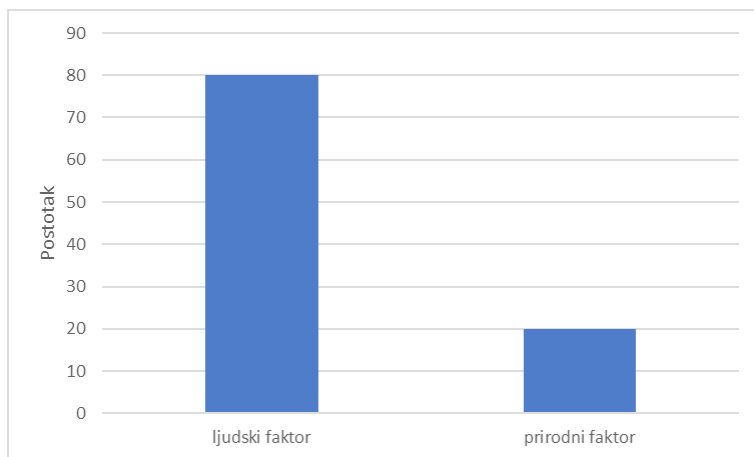


Slika 7. Rušenja u ovisnosti o tipu rasponske konstrukcije

U literaturi [21], koja obuhvaća statističke podatke više drugih istraživanja, je vidljivo da se broj srušenih grednih mostova kreće između 17 % i 74 %. Udio srušenih lučnih mostova je između 3 % i 29 %, ovješanih 2 – 5 %, a visećih 1 – 4 %. Treba napomenuti da u svim uzorcima postoji velik broj mostova za koji nije poznat nosivi sklop (11 – 61 %). Postotak rušenja lučnih mostova iz ovog rada usporediv je s onima iz literature [21]. Ukoliko svrstamo konzolne i okvirne mostove u skupinu grednih mostova, tada su podatci dobiveni na uzorku u ovom radu usporedivi s podacima u literaturi [21].

3.5. Ljudski i prirodni faktor

U uzorku koji je analiziran, ljudski faktori rušenja su: greške prilikom projektiranja, greške u gradnji, greške prilikom uklanjanja te neadekvatno održavanje, preopterećenje, udar, marširanje i ratna djelovanja (Slika 8), dok su prirodni poplava, potres, tornado te udar leda (Slika 9).

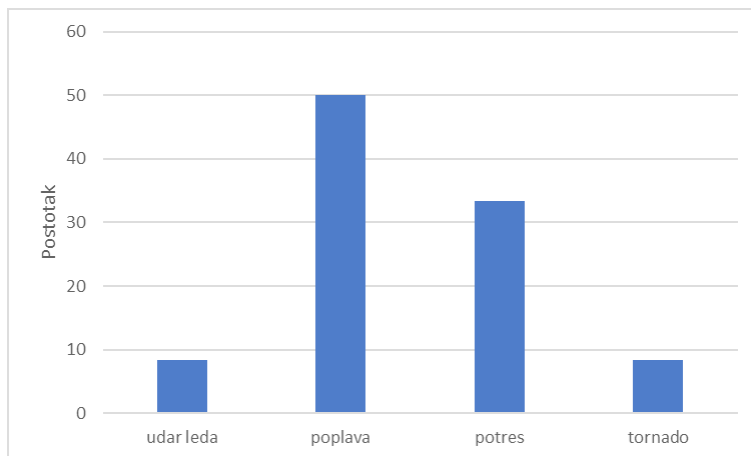


Slika 8. Rušenja u ovisnosti o ljudskom ili prirodnom faktoru

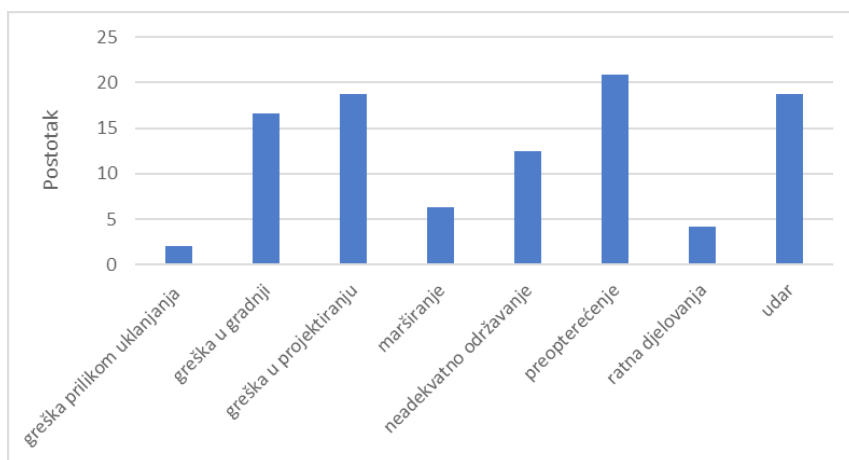
Kao što se može vidjeti na Slici 8, 80 % mostova u uzorku je srušeno uslijed ljudskog faktora. Navedeni podatci usporedivi su s drugim statistikama: prema [7], u Kini je od 2009. do 2019. godine 70 % mostova srušeno uslijed ljudskog faktora; prema [8], istraživanjem na 350 nasumično odabranih rušenja mostova u proteklih 200 godina u svijetu utvrđeno je da je 75 % rušenja uzrokovao ljudski faktor.

Kod prirodnih faktora (Slika 9), u analiziranom uzorku 50 % urušavanja uzrokuju poplave, 33 % potresi, a ostale tornado i odroni leda. Poplave i druge hidrauličke pojave poput podlokavanja ili udara leda su, prema literaturi [5, 7, 8], glavni uzrok rušenja uzrokovan prirodnim faktorima, dok su drugi faktori bitno manje zastupljeni.

Kod ljudskog faktora (Slika 10), najveći udio imaju preopterećenje (21 %), greške u projektiranju i gradnji (16 % i 18 %), te udar (18 %) i neadekvatno održavanje (13 %). Prema literaturi [8], greške u proračunu zauzimaju 33 %, greške u izgradnji 13 %, udar i preopterećenje 47 % te neadekvatno održavanje 7 %. Prema [7], greške u građenju su odgovorne za 40 % rušenja, greške u projektiranju za 12 %, udar za 26 % i preopterećenje za 14 %. Rezultati provedene analize unutar ljudskog faktora usporedivi su s onima iz literature [7] koja analizira rušenja mostova u Kini, kao i s literaturom [8], u kojoj se analizira rušenja mostova u SAD-u.



Slika 9. Rušenja u ovisnosti o prirodnom faktoru



Slika 10. Rušenja u ovisnosti o ljudskom faktoru

4. Zaključak

Mostovi kao građevine kojima se ostvaruje prijelaz preko postojeće prepreke sežu daleko u prošlost. Iako ih možemo smjestiti u određene kategorije, graditi istim tehnikama ili materijalima, svaki je most specifičan i poseban.

Ovim radom prikazan je uzorak mostova i razlozi njihovog urušavanja u postotcima. S obzirom na ograničenost dostupnih podataka, većina

mostova izgrađena je u 20. stoljeću. To razdoblje u graditeljstvu karakterizira korištenje novih materijala poput čelika, armiranog i prednapetog betona, kao i jednostavan moderni izgled. Zbog tih značajki 20. stoljeća u mostogradnji prevladavaju čelični te betonski mostovi. Iz navedenih razloga su upravo betonski i čelični mostovi najzastupljeniji srušeni mostovi. Uz podjelu prema razdoblju, materijalu i tipu mosta prikazana je i podjela prema uzroku rušenja – ovisno o tome radi li se o ljudskom ili prirodnom faktoru. Prema analiziranom uzorku mostova, nad prirodnim pojavama prevladavaju ljudske greške, a ponajviše greške prilikom gradnje i proračuna te neadekvatno održavanje. Podjela prema državama i kontinentima pokazuje kako rušenje mostova nije nužno vezano uz razvoj, bogatstvo i prometnu opterećenost pojedine zemlje.

Podatci o rušenjima mostova izrađeni u ovom radu usporedivi su s podacima koji se mogu naći u drugoj relevantnoj literaturi, što pokazuje da se uzorak od 60 analiziranih mostova može smatrati relevantnim.

***Zahvala.** Rad je nastavak istraživanja započetog u završnom radu a provodi se u sklopu UNIRI projekta Poboljšanje proračunskih modela za ocjenu stanja građevinskih konstrukcija (uniri-tehnic-18-127).*

Literatura

- [1] Limaye, S. V., Pujari, A. B. (2020) A Review on Progressive Collapse of the Bridge, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 7(8), str. 3180-3184
- [2] Chandra, S., Kumar, N. (2020) Bridge Failure and Consequences, JETIR, 7(5), str. 1052-1059
- [3] Choudhury Jamilur, C., Ariful, H. (2015) Bridge Collapses around the World: Causes and Mechanisms, IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh IABSE, str. 26-34
- [4] Deng, L., Wang, W, Yu, Y. (2016) State-of-the-Art Review on the Causes and Mechanisms of Bridge Collapse, Journal of Performance of Constructed Facilities, 30 (2), str. 1-13
- [5] Cook, W. (2014) Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends, Doctoral thesis, Utah State University, Logan, Utah
- [6] Wardhana, K., Hadipriono, F. C. (2003) Analysis of Recent Bridge Failures in the United States, Journal of Performance of Constructed Facilities, 17(3), str. 144-150
- [7] Tan, J.-S., Elbaz, K., Wang, Z.-F., Shen, J.S., Chen, J. (2020) Lessons Learnt from Bridge Collapse: A View of Sustainable Management. Sustainability, 12, 1205. <https://doi.org/10.3390/su12031205>
- [8] Biezma, M. V., Schanack, F. (2007) Collapse of Steel Bridges, Journal of Performance of Constructed Facilities, 21(5), str. 398-405

- [9] Domaneschi, M., et al. (2020) Collapse Analysis of the Polcevera Viaduct by the Applied Element Method, *Engineering Structures*, 214, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110659>
- [10] Invernizzi, S., Montagnoli, F., Carpinteri, A. (2019) Fatigue Assessment of the Collapsed XXth Century Cable-Stayed Polcevera Bridge in Genoa, *Procedia Structural Integrity*, 18, str. 237-244, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.159>.
- [11] Jagarinec, K. (2021) Rušenje mostova. Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:803115>
- [12] <https://www.simscale.com/blog/2018/07/tacoma-narrows-bridge-collapse/>, pristup 8. 7. 2021.
- [13] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=61856>, pristup 10. 9. 2021.
- [14] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=31944>, pristup 8. 7. 2021.
- [15] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=51918>, pristup 27. 8. 2021.
- [16] <https://manchestervictorianarchitects.org.uk/buildings/suspension-bridge-broughton>, pristup 10. 8. 2021.
- [17] <https://researchcourse.pbworks.com/f/structural+engineering.pdf>, pristup 20. 9. 2022.
- [18] Lee, G.C., Mohan, S.B., Huang, C., et al. (2013) A Study of U.S. Bridge Failures (1980-2012), State University of New York at Buffalo, New York.
- [19] Ji, B., Fu, Z. (2010) Analysis of Chinese Bridge Collapse Accident Causes in Recent Years, *China Civil Engineering Journal* 43 (S1), str. 495-498.
- [20] McLinn, J. (2009) Major Bridge Collapses in the US, and around the World, IEER Reliability Society 2009 Annula Technology Report, str. 1-5
- [21] Zhang, G., Liu, Y., Liu, J., Lan, S., Yang, J. (2022) Causes and Statistical Characteristics of Bridge Failures: A review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 9(3), str 388-406

