

Primljen / Received: 26.4.2021.

Ispravljen / Corrected: 1.9.2021.

Prihvaćen / Accepted: 4.11.2021.

Dostupno online / Available online: 10.12.2021.

Primjena bespilotnih letjelica u ocjeni stanja mostovne infrastrukture

Autori:

**Suzana Ereiz**, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

suzana.ereiz@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju

Doc.dr.sc. **Marko Bartolac**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

marko.bartolac@grad.unizg.hr**Jurica Goričanec**, mag.ing.el.techn.inf.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet elektrotehnike i računarstva

jurica.goricane@fer.hrIzv.prof.dr.sc. **Matko Orsag**, mag.ing.el.techn.inf.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet elektrotehnike i računarstva

matko.orsag@fer.hr

Pregledni rad

Suzana Ereiz, Marko Bartolac, Jurica Goričanec, Matko Orsag

Primjena bespilotnih letjelica u ocjeni stanja mostovne infrastrukture

Nedostatci klasičnih metoda pregleda građevina prometne infrastrukture doveli su do razvoja učinkovitijih, pouzdanijih, bržih i jeftinijih postupaka za ocjenu stanja te procjenu nosivosti i uporabnog vijeka građevina. U tom kontekstu, najistaknutiju ulogu imaju različiti autonomni sustavi razvijeni u posljednjih desetak godina, čiji se napredak neprestano ubrzava. U radu je dan pregled stanja područja upotrebe bespilotnih letjelica za pregled konstrukcija s naglaskom na preglede mostova. Rad uključuje sljedeće: prikaz aktualne zakonske regulative koja propisuje tipove i učestalost izvođenja pregleda; osvrt na trenutačno zastupljene klasične metode pregleda te njihove prednosti i nedostatke; analizu prednosti i nedostataka upotrebe bespilotnih letjelica za preglede mostova te pregled opreme koja se najčešće koristi prilikom njihova razvoja.

Ključne riječi:

bespilotne letjelice, ocjena stanja, mostovi, zakonska regulativa, monitoring građevina

Subject review

Suzana Ereiz, Marko Bartolac, Jurica Goričanec, Matko Orsag

Application of UAVs for assessment of bridge infrastructure

The shortcomings of classical methods for inspection of transport infrastructure objects have led to the development of more efficient, more reliable, faster and cheaper procedures for condition assessment and load-bearing capacity and service life estimation of objects. In this context, different autonomous systems developed in the last decade have the most notable role and their development is continuously speeding up. This paper provides a state of the art review of the unmanned aerial vehicles application for structural inspection with a focus on bridges. The paper comprises the following: a review of the current regulations prescribing the types and frequency of inspections; a review of the current classical inspection methods with their advantages and disadvantages; analysis of advantages and disadvantages in application of unmanned aerial vehicles for bridge inspections and a review of the equipment commonly used in their development.

Key words:

unmanned aerial vehicles, condition assessment, bridges, regulations, structural health monitoring

1. Uvod

Kako bi se održala bitna svojstva građevina kao što su mehanička otpornost i stabilnost, trajnost i sigurnost korisnika, vlasnik građevine prema zakonskim obvezama dužan je redovito održavati građevinu. Građevine prometne infrastrukture svakodnevno su u upotrebi, a s obzirom na prometnu važnost koju nose, moraju zadovoljiti sve strože zahtjeve funkcionalnosti. U nastavku je dan kratak pregled klasičnih metoda koje se koriste pri ocjeni stanja mostova.

Klasične metode pregleda mostova kao ključnih elemenata prometne infrastrukture podrazumijevaju provođenje vizualnog pregleda, nerazornih metoda ispitivanja, geodetska mjerenja te statičko i dinamičko ispitivanje mosta. Vizualnim pregledom na relativno jednostavan način moguće je odrediti oštećenja na gornjem i donjem ustroju mosta. Međutim, određeni dijelovi mostova su često teško dostupni pa se za obavljanje pregleda koriste pristupna vozila i pristupna oprema (slika 1.).

Ako se tijekom vizualnog pregleda uoče neka oštećenja koja je potrebno detaljnije kvantificirati, provode se u prvom redu nerazorne metode ispitivanja (npr. ultrazvučno ispitivanje, sklerometar, infracrvena termografija, zvučna emisija i sl.). Geodetska mjerenja provode se u svrhu utvrđivanja i praćenja promjene geometrije konstrukcije tijekom vremena. Također, ova mjerenja provode se i tijekom statičkih te rjeđe tijekom

dinamičkih ispitivanja. Pomoću njih je na konstrukciji moguće utvrditi pomake i relativne deformacije upotrebom direktnih mjerenja, fotogrametrije, različitih tipova laserskih skenera, globalnih navigacijskih satelitskih sustava (GNSS), geometrijskih nivelmana i sl. Tijekom provođenja statičkog ispitivanja, osim uređaja koji se uobičajeno koriste za geodetska mjerenja (npr. niveliri i totalne stanice), koriste se i posebni mjerni uređaji (slika 2.) kao što su induktivna osjetila (eng. *Linear Variable Differential Transformer* - LVDT) ili laseri [2].

Dinamičkim ispitivanjem mosta utvrđuju se dinamički parametri konstrukcije – vlastite frekvencije, oblici titranja, koeficijenti prigušenja. U slučaju njihove periodičke provjere, ovi parametri su od velike važnosti za otkrivanje mogućih oštećenja na konstrukciji tijekom vremena upotrebe. Osim dinamičkih parametara konstrukcije, tijekom ovih ispitivanja uobičajeno je mjeriti pomake i relativne deformacije elemenata konstrukcije tijekom prelaska vozila (tereta) te brzinu kojom vozilo prelazi preko mosta. Cilj ovih mjerenja je utvrditi dinamički koeficijent – indikator ponašanja konstrukcije izložene dinamičkom opterećenju u odnosu na njeno ponašanje pri statičkom opterećenju.

Zbog nedostupnosti pojedinih dijelova konstrukcije mosta i prometa koji se tijekom pregleda često odvija preko njega, trenutačno zastupljene klasične metode pregleda nesigurne su za ispitivače i korisnike mostova. Uz to, nedostatak predstavlja



Slika 1. Vizualni pregledi mostova: a) upotrebom pristupnih vozila; b) upotrebom pristupne opreme [1]



Slika 2. Uređaji za provođenje statičkog probnog ispitivanja konstrukcije: a) LVDT [3] b) Laser [4]



Slika 3. Primjeri rušenja mostova : a) I-35W most preko rijeke Mississippi (SAD) [7]; b) Most Morandi, Genova (Italija) [8]

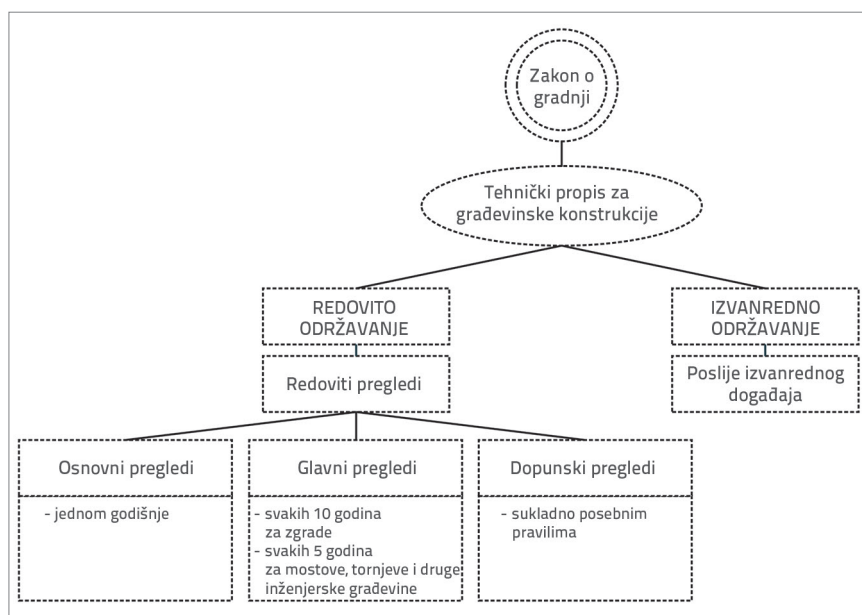
i nekonzistentnost između ispitivača koji potencijalno posjeduju različite vještine i sposobnosti. To često dolazi do izražaja jer isti ispitivači ne obavljaju pregled iste konstrukcije tijekom njena uporabnog vijeka. Primjena klasičnih metoda zahtijeva i upotrebu dodatne opreme kako bi se omogućio pristup teže dostupnim područjima (slika 1.). Posljedično, produljuje se vrijeme potrebno za obavljanje pregleda konstrukcije, a time i vrijeme zatvaranja pojedinih prometnih trakova ili prometnice u cijelosti. Osim toga, klasične metode pregleda nisu imune ni na pogreške [5]. Ono što ih također postavlja u nepovoljan položaj su i izvanredna djelovanja poput potresa i poplava [6] koja nerijetko ostavljaju i tragične posljedice (slika 3.).

Veliki dio postojeće infrastrukture ne zadovoljava sadašnje propise za protupotresno projektiranje [9]. Uz dotrajalo stanje, prethodno navedeno postavlja potres, posebno za određena područja Republike Hrvatske, kao jedan od ključnih rizika od katastrofa. Zbog prethodno navedenih nedostataka klasičnih metoda za pregled mostova, javlja se potreba za novim metodama koje će osigurati bržu, jeftiniju, učinkovitiju i pouzdaniju procjenu nosivosti i uporabljivosti građevina prometne infrastrukture. Razvojem sustava koji će to omogućiti, može se doprinijeti povećanju sigurnosti korisnika prometne infrastrukture i sprječavanju tragičnih posljedica urušavanja te uštedama u sektoru upravljanja prometnom infrastrukturom. Slijedi pregled relevantne regulative koja nalaže učestalost i opseg radnji provođenja pregleda.

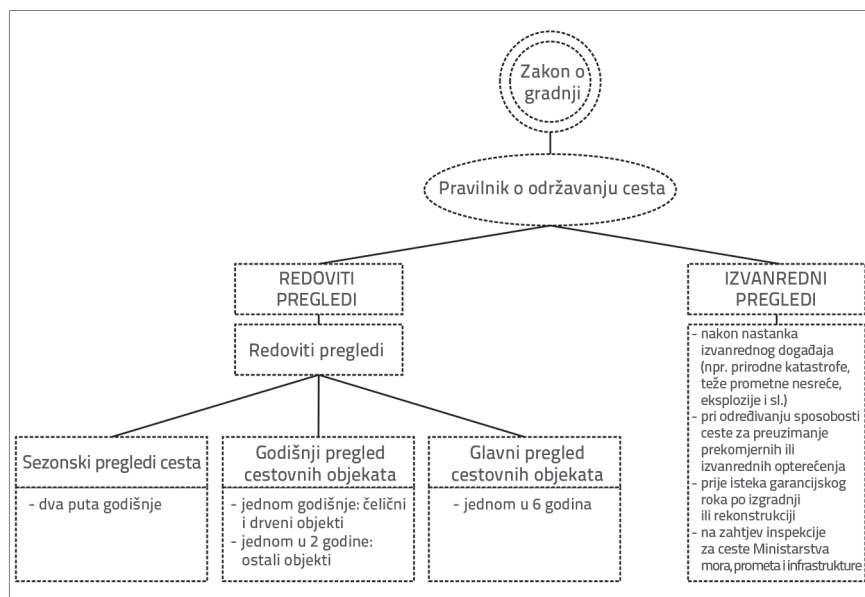
2. Relevantna regulativa

Prema Zakonu o gradnji [10], odnosno Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije [11] potrebno je provoditi redovito i izvanredno održavanje

građevinskih konstrukcija (slika 4.). U okviru redovitog održavanja građevinskih konstrukcija provode se redoviti pregledi. S obzirom na učestalost i opseg radnji, provode se kao: osnovni, glavni i dopunski pregledi. Vremenski razmak između pojedinih redovitih provođenja osnovnih pregleda ne smije biti duži od jedne godine. Glavni pregledi provode se u vremenskom razmaku od deset godina za zgrade, odnosno pet godina za mostove, tornjeve i druge inženjerske građevine. Dopunski pregledi za pojedine vrste konstrukcija provode se u vremenskom razmaku prema posebnim pravilima propisanim Tehničkim propisom za građevinske konstrukcije [11]. Osnovni pregledi provode se u svrhu utvrđivanja općeg stanja konstrukcije. Obuhvaćaju uvid u raspoloživu dokumentaciju i vizualni pregled glavnih elemenata konstrukcije bitnih za nosivost i otpornost na požar te njeno ispravno funkcioniranje. Ako se tijekom provedbe osnovnog pregleda utvrde nedostaci koji mogu utjecati na ispunjavanje zahtjeva mehaničke otpornosti i stabilnosti te otpornosti na



Slika 4. Tipovi i učestalost pregleda konstrukcija prema Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije [11]



Slika 5. Tipovi i učestalost pregleda konstrukcija prema Pravilniku o održavanju cesta [13]

požar, provode se dodatne kontrole i ispitivanja. Glavni pregledi provode se u svrhu utvrđivanja stanja konstrukcije i materijala s naglaskom na stanje: temelja, elemenata nosive konstrukcije, geometrije konstrukcije, ležajeva i oslonaca, debljine sloja antikorozivne zaštite, otpornosti na požar, sustava za odvodnju i drenažu, priključaka instalacija i opreme na elementima konstrukcije, brtvljenja i provjetravanja sandučastih elemenata, elemenata za osiguranje konstrukcije i ljudi, opreme za opažanje i mjerenje ponašanja konstrukcije (sustav monitoringa). Pregled se provodi vizualno, mjerenjima, ispitivanjima, uvidom u dokumentaciju građevine, uređaja i opreme [11]. Izvanredno održavanje provodi se poslije izvanrednog događaja u skladu s odredbama posebnog propisa koji uređuje održavanje građevina. S druge strane, prema Zakonu o cestama [12] odnosno Pravilniku o održavanju cesta [13] upravitelj cesta, odnosno izvođač radova, obavezan je osigurati provedbu redovitog i izvanrednog pregleda cesta i cestovnih objekata (slika 5.). Redoviti pregledi dijele se na: sezonske preglede cesta i godišnje i glavne preglede cestovnih objekata. Godišnji i glavni pregledi cestovnih objekata odnose se na objekte svijetlog raspona 5 m i više. Sezonski pregledi cesta obavljaju se dva puta godišnje, nakon zimskog razdoblja (ožujak-svibanj) te u jesen (rujan-studen). Njima je obuhvaćena provjera stanja ceste odnosno razina njena oštećenja. Upravitelj cesta, odnosno izvođač, dužan je osigurati da se čelični i drveni cestovni objekti pregledavaju najmanje jednom godišnje. Za druge cestovne objekte potrebno je osigurati njihov pregled najmanje jednom u dvije godine. Prema Pravilniku [13], prilikom pregleda cestovnih objekata pregledavaju se svi dostupni dijelovi, te ovisno o njihovu stanju ili zbog različitih zahtjeva, potrebno je obaviti specijalistička mjerenja i ispitivanja. Glavni pregledi cestovnih objekata obavljaju se prema Pravilniku [13] jednom u šest godina. Oni obuhvaćaju sve dijelove objekta i provedbu potrebnih specijalističkih mjerenja i ispitivanja.

Izvanredni pregledi obavljaju se: odmah nakon nastanka izvanrednog događaja kao što su prirodne katastrofe, teže prometne nesreće, eksplozije, požari, klizanje terena; pri određivanju sposobnosti ceste za preuzimanje prekomjernih ili izvanrednih opterećenja; prije isteka jamstvenog roka nakon izgradnje ili rekonstrukcije, na zahtjev inspekcije za ceste Ministarstva mora, prometa i infrastrukture [13].

3. Autonomni sustavi letjelica za pregled konstrukcija

Kako je prije navedeno, provođenje klasičnih metoda pregleda i dalje je uobičajena praksa u ocjeni stanja mostova te se smatra pouzdanom. U drugima industrijama (npr. zrakoplovna i automobilska) ljudska pogreška je

široko kritizirana, praćena, procjenjivana i strogo ograničena već desetljećima. Primjerice, automatizirani uređaji za preglede u zrakoplovnoj su industriji postali svakodnevna rutina i opremljeni su različitim softverskim paketima [14]. U pregledima mostova također se uviđa potencijal ovakvih sustava kako bi se automatizirala i unaprijedila sadašnja praksa i klasične metode pregleda. Nekoliko autonomnih sustava bespilotnih letjelica već je razvijeno kako za pregled građevina prometne infrastrukture tako i za pregled građevina poput vjetroagregata [15], brana [16], industrijskih instalacija [17], dimnjaka industrijskih postrojenja [18] i sl. (slika 6.).

3.1. Bespilotne letjelice

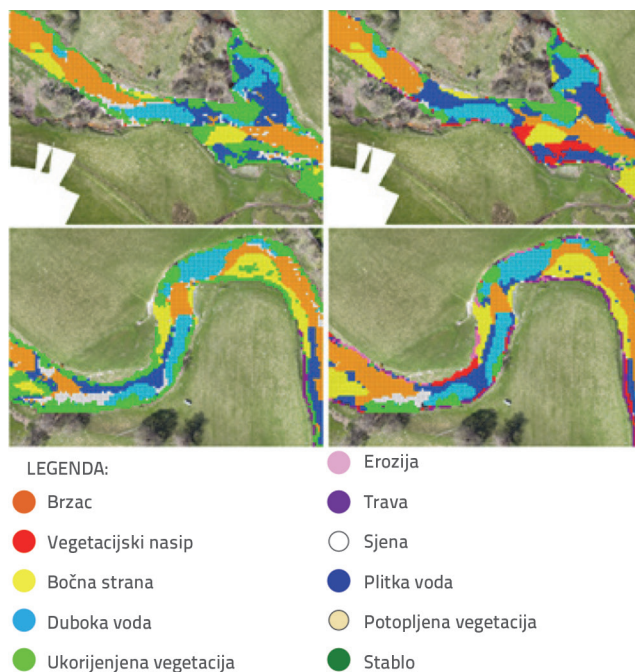
Prema Pravilniku o sustavima bespilotnih zrakoplova [19], bespilotni zrakoplov (letjelica) je zrakoplov namijenjen izvođenju letenja bez pilota, koji je daljinski upravljani ili programiran i autonoman. Ovisno o namjeni, njihova svojstva variraju, uključujući broj i težinu ugrađenih senzora, maksimalnu visinu leta, maksimalno trajanje leta, itd. Mogu imati fiksirana krila ili propelere. Razvoj autonomnih bespilotnih letjelica započeo je 1898. godine kada je Nikola Tesla osmislio osnovu za njihovo daljinsko upravljanje. Patentirao je bežični upravljački mehanizam brodova i vozila koji je iste godine konstruirao i predstavio javnosti u New Yorku [20]. Prve bespilotne letjelice konstruirane su u doba između Prvog i Drugog svjetskog rata i koristile su se uglavnom u vojne svrhe. Bili su to vojni zrakoplovi opremljeni daljinskim uređajem za upravljanje sa žiroskopom, uređajem za daljinsko vođenje ili radijskim uređajem [21]. Upotreba bespilotnih letjelica na području Republike Hrvatske zabilježena je početkom Domovinskog rata kada su razvijeni bespilotni zrakoplovi MAH 01, MAH 02 te M99 bojnič. Osim za potrebe izvođenja vojnih operacija, razvijane su i za razne



Slika 6. Pregled različitih tipova građevina korištenjem autonomnih sustava: a) vjetroagregat [15]; b) brane [16]; c) industrijske instalacije [17]; d) dimnjaci industrijskih postrojenja [18]

druge svrhe. Tako je 2003. godine na području Zagreba razvijen prototip bespilotnog zrakoplova *Fenix* namijenjen nadzoru požarišta. Tri godine kasnije, 2006., razvijeni su prototipovi stratosferskih bespilotnih zračnih brodova kao platformi za daljinska istraživanja, mobilne telekomunikacije i sl. Razne tvrtke sve se više u posljednje vrijeme bave razvojem bespilotnih letjelica i različitih programskih podrški koje njihova primjena zahtijeva [21]. U području građevinarstva bespilotne letjelice koriste se i za kontrolu gradilišta, nadzoru statusa projekata te u povećanju sigurnosti radnika [22, 23]. Njihova upotreba na gradilištima pruža građevinskim timovima pogled na radna mjesta, materijale, strojeve i ljude. Izvođači ih također koriste za učinkovitije i sigurnije praćenje provedbe projekta. Snimljene fotografije i videozapisi pomažu u optimizaciji procesa gradnje, omogućavaju izvještavanje o napretku projekta te stjecanje uvida za donošenje bržih, pouzdanijih i boljih odluka. Osim toga, njihovom primjenom mogu se utvrđivati razlike između projektiranog i izvedenog stanja. Njihova korisnost, u ovom slučaju, može se poboljšati upotrebom termalnih kamera i raznih drugih senzora poput alata za mapiranje i GNSS -a. Također, mogu se koristiti i kao učinkovita metoda za određivanje stanja obala rijeka i njihova toka (slika 7.). Na taj način mogu se otkriti uzroci mogućeg podlokavanja temelja i ostale promjene u toku rijeke koje bi mogle imati utjecaj na nosivost i uporabivost mosta koji tu rijeku premošćuje [24]. Na temelju obrade podataka koje bespilotna letjelica prikupi moguće je odrediti volumen, poprečni

presjek, slojnice i druge tipove parametara koji se koriste u geomehanici za analizu odrona [25].



Slika 7. Praćenje stanja korita rijeke primjenom bespilotne letjelice [24]

Bespilotne letjelice također mogu omogućiti provedbu i raznih drugih tipova ispitivanja koja mogu biti ključna u ocjeni stanja konstrukcija [26], detekciji oštećenja [27] i daljnjim postupcima upravljanja i održavanja [28].

Razvojem autonomnih sustava za upravljanje bespilotnim letjelicama smanjuje se utjecaj operatera tijekom upravljanja i mogućnost ljudske pogreške te se povećava jednostavnost upotrebe bespilotnih letjelica kao i ponovljivost operacija prilikom pregleda. Primjer takvog sustava razvijen je u sklopu *ESMERA* projekta *Autonomous UAV inspection of wind turbine blades – AeroWind* za autonomnu inspekciju lopatica vjetroelektrana [29]. Sustav je projektiran tako da se u prvoj fazi obavlja registracija vjetroelektrane u prostoru na temelju poznatog 3D modela i podataka prikupljenih LiDAR-om na letjelici. Nakon toga, u drugoj fazi izvodi se let po unaprijed definiranoj trajektoriji čime se prikupljaju podaci potrebni u inspekciji lopatica. Time je osigurana ponovljivost leta na točno određenoj udaljenosti i sa zadanom orijentacijom letjelice u odnosu na vjetroelektranu te posljedično tomu visoka kvaliteta prikupljenih podataka. Dodatna prednost ovog sustava je ta što proces registracije ne zahtijeva poznavanje 3D modela svake pojedinačne vjetroelektrane već ga je moguće odraditi na svim vjetroelektranama koje tipom i dimenzijama odgovaraju poznatom modelu, što značajno skraćuje vrijeme potrebno za pripremu i obavljanje inspekcije.

Uz povećanje autonomnih mogućnosti bespilotnih letjelica, kao što su vrlo precizno slijeđenje trajektorije i izbjegavanje prepreka [30], sve je više istraživanja posvećeno sustavima koji se sastoje od više bespilotnih letjelica koje istovremeno obavljanju određenu zadaću. Tako se na *EC Horizon 2020 projektu Energy aware BIM Cloud Platform in a Cost-effective Building Renovation Context – ENCORE* razvija sustav s više bespilotnih letjelica namijenjen prikupljanju podataka za izradu i rekonstrukciju 3D modela zgrada. Ti modeli bit će korišteni kao podloga za obnovu te povećanje energetske učinkovitosti zgrada diljem Europe. Sustav se sastoji od bespilotnih letjelica opremljenih LiDAR-om, sensorima za prikupljanje podataka za fotogrametriju te sustavima za prikupljanje željenih podataka u dodiru sa zidom zgrade. Izvođenje operacija se obavlja autonomno na temelju geodetskih podataka o lokaciji zgrade i mjerenjima navigacijskih senzora uz nadzor operatera.

3.2. Zahtjevi za opremu bespilotnih letjelica za preglede konstrukcija

Bespilotne letjelice uglavnom sadrže sustave koji pružaju izuzetno kvalitetne fotografije koje omogućavaju vrlo točnu i preciznu vizualnu procjenu stanja objekta koji se pregledava. Integriranje bespilotnih letjelica sa softverima za kontrolu i analitiku, umjetnu inteligenciju, 3D snimanje i druge alate, povećava njihovu sposobnost za dobivanje širokog spektra informacija i identificiranje oštećenja poput pukotina, habanja, korozije, i sl. Osim kvalitete sustava integriranih na bespilotne letjelice, vrlo je bitna pozicija sustava koji obavljaju prikupljanje fotografija i videozapisa. Ona bi im trebala omogućiti neometan rad, rotaciju i pregled što šireg područja. Za visoke i duge konstrukcije

potrebno je osigurati duljinu daljinskog dometa budući da se osoba koja upravlja bespilotnom letjelicom ne može fizički približiti kako bi neometano obavila pregled. Slike koje tijekom pregleda konstrukcije bespilotna letjelica zabilježi, posebni softveri sklapaju u 3D model koji inženjeri mogu pregledavati na računalima, prepoznati na njima nedostatke ili ih upotrijebiti za buduće projekte. Jedan klik na vrlo mali detalj može s bibliotekom fotografija povezati fotografije tog detalja koje se protežu unatrag kroz vrijeme. Na taj način omogućava se rekonstrukcija vremenskog tijeka degradacije konstrukcije te se može odrediti trenutak u kojem je došlo do pojave oštećenja na konstrukciji.

Vrsta i broj senzora koji su integrirani na autonomne bespilotne letjelice ovise o zahtjevima njihove upotrebe i njihovoj primjeni. U većini slučajeva senzori na bespilotnim letjelicama trebaju biti beskontaktni, što uporabu ograničava na provedbu nerazornih metoda pregleda. Najpopularniji senzori za ocjenu i pregled konstrukcija su vizualne i termalne kamere. Na raspolaganju je također i niz senzora koji su nužni za funkcioniranje sustava autopilota i upravljanje bespilotnim letjelicama. Ovdje će se navesti najčešće primjenjivani tipovi senzora i opreme koji se mogu integrirati na bespilotne letjelice te njihove primjene.

Kamere za snimanje vidljivog dijela spektra

Za obavljanje pregleda bespilotnim letjelicama najčešće se primjenjuju kamere za snimanje vidljivog dijela spektra. Spektralni raspon tih kamera je unutar vidljivog raspona, drugim riječima, s valnim duljinama od 390 do 700 nm. Zahtjevi za podacima visoke kvalitete i rezolucije doveli su do razvoja kamera prilagođenih posebno za bespilotne letjelice koje imaju integrirane sustave za kontrolu i stabilizaciju, čime se smanjuje utjecaj vibracija letjelice i motora te se kompenziraju nagle rotacije kod leta. Posljedice loših vremenskih uvjeta poput slabe vidljivosti i osvjetljenja, refleksija Sunčeve svjetlosti od snimanog objekta te doba dana, odnosno smjer dopiranja svjetlosnih zraka mogu nepovoljno utjecati na kvalitetu prikupljenih podataka.

Termalne i infracrvene kamere

Termalne kamere mogu mjeriti emitiranu energiju i pretvoriti je u temperaturu. Postoje dva pristupa koja se koriste u infracrvenoj termografiji: pasivni i aktivni. Pasivni pristup oslanja se na toplinska svojstva materijala i građevina koje imaju različite temperature od temperature okoline. Aktivna termografija zasniva se na promatranju dinamičke površine objekta koji je izložen toplinskoj pobudi. U pregledu mostova pasivna termografija ima smisla ako se koristi okolna toplina koju generira Sunce. Termografija se koristi za otkrivanje nedostataka na gornjem ustroju mosta i njegovim betonskim dijelovima [31].

Multispektralni i hiperspektralni senzori

Multispektralni i hiperspektralni senzori svrstavaju se u moderne progresivne tehnologije i služe za dobivanje preciznih i točnih informacija o objektima. Koriste se višekanalnim detektorima i bilježe zračenje unutar uskih raspona valnih duljina. Multispektralni senzori koriste detektore od 10 kanala, a

Tablica 1. Značajke autonomnih sustava bespilotnih letjelica za pregled mostova [31]

Bespilotna letjelica	Senzori (rezolucija)	Sustav pozicioniranja	Dimenzije [cm]	t [min]	Cijena [\$]	Primjena
Parrot BEBOP 2	V (4096x3072)	GNSS	32.8 x 32.8	25	500-700	- Let preko mosta - Površinske pukotine (> 8 mm)
3DR Iris*	V	GNSS	63 x 38	20	600-800	- Rutinski pregledi
3DR Solo*	V	GNSS	40 x 40	20	800-1000	- Kontrola integriteta konstrukcije mosta
DJI Mavic Air	V (3840x2160)	GNSS, Vizualni sustav	21.3 (D)	20	800-900	- Let preko i ispod mosta
DJI Mavic Pro	V (4096x2160)	GNSS, Vizualni sustav	33.5 (D)	27	1000-1200	- Površinske pukotine (0,04 mm)
DJI Phantom 4	V (4096x2160)	GNSS, Vizualni sustav	35 (D)	30	1800-2000	- Rutinski pregledi - Kontrola integriteta konstrukcije mosta
DJI Phantom 4 Pro	V+T (4096x2160)	GNSS, Vizualni sustav	35 (D)	30	5500-8000	- Let preko i ispod mosta
DJI Mavic Air	V+T (4096x2160)	GNSS, Vizualni sustav	21.3 (D)	20	4000-6000	- Površinske pukotine (0,04 mm) - Otkrivanje delaminacija
DJI Matrice 200	V+T (8192x5460)	GNSS, Vizualni sustav	64.3 (D)	17	13000-15000	- Rutinski pregledi - Kontrola integriteta konstrukcije mosta
Alabris SenseFly	V+T	GNSS	56 x 80	20	30000-35000	- Let preko i ispod mosta - Otkrivanje površinskih pukotina (0,04 mm) - Otkrivanje delaminacija - Rutinski pregled - Kontrola integriteta konstrukcije mosta
Altus LRX	V+T+LiDAR	GNSS	140 (D)	20	40000-50000	- Let preko mosta - Rekonstrukcija 3D modela - Otkrivanje mikro-pukotina (< 0,02 mm) - Otkrivanje delaminacija

Legenda:

V-kamere za snimanje vidljivog dijela spektra, T-termalni senzori, D- dijametar, t- maksimalno vrijeme letenja, *Nemaju integriranu kameru

hiperspektralni koriste detektore s više od 100 kanala. Spektralni pojasevi vidljivi multispektralnim i hiperspektralnim senzorima veći su od onih kod termalnih kamera i kamera za snimanje vidljivog dijela spektra jer pokrivaju širi raspon valnih duljina [31].

Optički mjerni uređaj lidar

LiDAR (eng. *Light Detection And Ranging*) služi za mjerenje udaljenosti i stvaranje prikaza projicirajući snop svjetlosti na predmet i područje od interesa te izračunavanje udaljenosti i detektiranje objekta. To se obavlja na način da se mjeri vrijeme koje je potrebno laserskom impulsu da putuje od senzora do objekta i natrag. Iz izmjenjenog vremena i poznate brzine svjetlosti određuje se udaljenost. Ovaj tip senzora može se

koristiti za rekonstrukciju 3D modela i karata iz područja od interesa ili za pružanje podataka bespilotnim letjelicama o mogućim preprekama na koje prilikom letenja može naići. Primjenom naprednih upravljačkih algoritama te podataka prikupljenih LiDAR-om u stvarnom vremenu omogućena je lokalizacija i navigacija bespilotne letjelice bez upotrebe GNSS sustava [32].

Ostali senzori

Na raspolaganju je i nekoliko drugih senzora koji se mogu koristiti i integrirati na bespilotnu letjelicu, ali je njihova upotreba ograničena zbog njihove težine i mogućnosti. Navede se neki od tih senzora.

- *Radarski sustavi.* Radarski sustav je elektronički uređaj za određivanje udaljenosti, azimuta i brzine na temelju odbijanja elektromagnetskih valova. Glavna primjena odnosi se uglavnom na mjerenje, mapiranje i inspekciju. Integracija radarskog sustava na bespilotnu letjelicu zabilježena je u nekoliko izvora [33, 34] i u njima je opisan princip integracije i razvoj SAR sustava.
- *Magnetni sustavi.* Magnetni senzori su senzori koji mogu generirati magnetsku energiju s velikim detaljima, identificirati različite metalne predmete u tlu i s dovoljno snage i točnosti mogu potencijalno generirati karte oštećenja u metalnim elementima poput čeličnih nosača [35].
- *Multisenzori i fuzija podataka.* Podaci dobiveni od različitih senzora mogu se kombinirati upotrebom tehnike fuzije podataka. Primjerice, kombinacijom radiometara, kamera za snimanje vidljivog dijela spektra, kemijskih senzora i termalnih infracrvenih senzora moguće je mjeriti relativnu vlažnost i temperaturu, CO₂ i brzinu vjetrova [36].

3.3. Dostupni autonomni sustavi bespilotnih letjelica za pregled mostova

Dostupne tehnologije autonomnih bespilotnih letjelica te njihov izbor prije same primjene vrlo je kompleksan kao i njihov razvoj. Vrlo je malo zasad dostupnih smjernica koje bi bile od pomoći prilikom odabira bespilotne letjelice, senzora i ostale opreme, što u konačnici može biti vrlo izazovno. Ovisno o namjeni, cijena značajno varira te na nju utječe i sama kvaliteta bespilotne letjelice, količina integriranih senzora te računalni kapacitet i brzina prijenos podataka koje letjelica prikupi. Integriranje termalnih kamera s postojećim kamerama za snimanje vidljivog dijela spektra može povećati osnovnu cijenu letjelice i do tri puta [37]. Ako primjena bespilotne letjelice uključuje izradu i rekonstrukciju 3D modela mosta, osim cijene, raste i veličina letjelice. Ako je bespilotna letjelica namijenjena za pregled ispod mostova, mora imati pomoćni sustav za pozicioniranje kako bi se nadoknadio gubitak GNSS signala. U tablici 1. dan je pregled autonomnih sustava bespilotnih letjelica za preglede mostova, njihove karakteristike (integrirani senzori, sustav pozicioniranja, dimenzije, maksimalno vrijeme letenja (t), tržišna cijena) i primjena. Izazovi tijekom svakog pregleda mosta korištenjem bespilotnih letjelica dovode do njihova razvoja i poboljšanja.

3.4. Primjer primjene bespilotne letjelice za pregled mostovne infrastrukture

Testiranje sustava bespilotne letjelice za vizualni pregled mosta u smislu izrade oblaka točaka, 3D modela i detekcije oštećenja provedeno je na mostu dr. Franja Tuđmana u Dubrovniku. Korištena je multirotorska bespilotna letjelica s karbonskim okvirom i četiri motora (slika 8.). Dimenzije bespilotne letjelice su 1,2 m x 1,2 m x 0,45 m, a masa je 8 kg. Letjelica se napaja s dvije LiPo baterije velikog kapaciteta čime se postiže autonomija od 30 minuta. Kontrola letjelice obavlja se pomoću Pixhawk autopilota

i Intel NUC računala na letjelici koje služi za implementaciju kompleksnih algoritama upravljanja i obradu podataka sa senzora u stvarnom vremenu. Letjelica je opremljena kamerom visoke rezolucije s mogućnošću optičkog zooma do 8x (Sony RX100 VII) te Velodyne Puck LiDAR sensorom. Podaci su prikupljeni letovima u ručnom modu rada te autonomnim letovima baziranim na navigaciji pomoću GNSS-a.

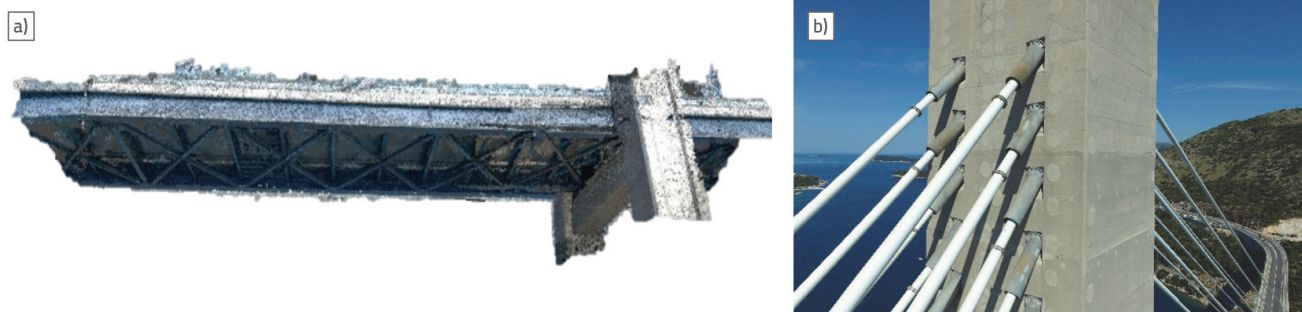


Slika 8. Multirotorska bespilotna letjelica s karbonskim kućištem i četiri pogonska motora opremljena sustavom senzora za vizualni pregled mosta

U letovima su sudjelovala dva operatera – jedan koji upravlja letjelicom u ručnom modu rada i ima ulogu sigurnosnog pilota kod autonomnog leta te drugi koji je odgovoran za upravljanje kamerom u oba moda rada. Na temelju fotografija snimljenih tijekom inspekcije i fotogrametrijskom obradom podataka u programskom paketu Meshroom, izrađen je 3D oblak točaka na mostu. Informacije o pozicijama na kojima su snimljene fotografije dobivene su iz podataka s GNSS senzora letjelice. Korištenje georeferenciranih fotografija u značajnoj mjeri ubrzava proces fotogrametrijske obrade podataka te osigurava veću kvalitetu dobivenog oblaka točaka. Na slici 9.a prikazan je rekonstruirani oblak točaka dijela rasponske konstrukcije dobiven obradom podataka sa senzora letjelice (kamera i LiDAR), a na slici 9.b prikazana je fotografija vrha betonskog pilona mosta na mjestu spoja s nosivim kabelima snimljena tijekom inspekcije. Uz podatke o mostu, tijekom provedenih testiranja prikupljeni su i podaci o utjecaju čelične konstrukcije mosta na senzore bespilotne letjelice koji služe za stabilizaciju i navigaciju (magnetometar i GNSS). Naime, prije testnih letova uočeni su problemi na kalibraciji magnetometra te se zbog toga točka polijetanja morala postaviti na dovoljnoj udaljenosti od mosta da se izbjegne utjecaj čelične rasponske konstrukcije na senzore letjelice. Prilikom daljnjeg razvoja algoritama upravljanja i navigacije bespilotne letjelice za inspekciju mostova bit će potrebno uzeti u obzir utjecaj konstrukcije koja može stvoriti razinu mjernog šuma koja značajno utječe na rad i preciznost mjerenja senzora.

3.5. Prednosti i nedostaci bespilotnih letjelica

Sustavi bespilotnih letjelica, za razliku od zasad prisutnih klasičnih metoda pregleda, stvaraju sustav koji je objektivan, ponovljiv i precizan. Ponekad je ispitivačima vrlo teško ujednačeno kvantificirati nedostatke uočene tijekom pregleda,



Slika 9. a) Detalj rekonstruiranog oblaka točaka dijela rasponske konstrukcije mosta; b) Fotografija pilona na mjestu spoja s nosivim kabelima snimljena tijekom inspekcije mosta bespilotnom letjelicom

Tablica 2. Kategorije i zahtjevi za operacije sustavima bespilotnih letjelica [43]

OTVORENA	POSEBNA	CERTIFICIRANA
<ul style="list-style-type: none"> - Nizak ili zanemariv rizik prema trećim stranama - Operacije se provode u skladu s osnovnim, unaprijed definiranim karakteristikama - Operacije ne podliježu nikakvim daljnjim zahtjevima za odobrenjem - Najveća dopuštena masa pri polijetanju < 25 kg - Održavanje bespilotnog zrakoplova na sigurnoj udaljenosti od ljudi - Udaljeni pilot neprestano održava vizualni kontakt sa zrakoplovom kojim upravlja - Ako ne prelijeće umjetnu tvorevinu, bespilotni zrakoplov ne leti više od 120 m iznad najbliže točke tla 	<ul style="list-style-type: none"> - Predstavljaju rizik prema trećim stranama - Operacije kod kojih jedan ili više elemenata izlazi izvan granica otvorene kategorije - Za izvođenje operacija potrebno je ishoditi operativno Odobrenje od Hrvatske agencije za civilno zrakoplovstvo (HACZ) na temelju procjene sigurnosnih rizika - Ako se bespilotnim zrakoplovom izvodi letačka operacija koja odgovara standardnom scenariju operator nadležnom tijelu podnosi Izjavu i nije dužan ishoditi odobrenje za rad - Odobrenje za rad ne izdaje se ni u sljedećim slučajevima: <ol style="list-style-type: none"> 1. Operator bespilotnog zrakoplova ima laki certifikat (LUC) s odgovarajućim povlasticama 2. Letačke operacije provode se u okviru zrakoplovno-modelarskih klubova i udruga koje su dobile odobrenje 	<ul style="list-style-type: none"> - Operacije koje predstavljaju istovrijedan rizik kao i zrakoplovstvo s posadom - Podvrgnuta istom regulatornom postupku kao i zrakoplovstvo s posadom - Letačke operacije koje ispunjavaju sljedeće: <ol style="list-style-type: none"> 1. Bespilotni zrakoplov je certificiran 2. Letačka operacija: <ul style="list-style-type: none"> - se izvodi iznad skupine ljudi - uključuje prijevoz ljudi - uključuje prijevoz opasne robe zbog čega bi treće strane bile izložene visokom riziku u slučaju nesreće - Letačke operacije svrstavaju se u certificiranu kategoriju ako nadležno tijelo na temelju procjene rizika smatra da se rizik operacije ne može dovoljno ublažiti ako se bespilotni zrakoplov i operator ne certificiraju i ako, prema potrebi, udaljeni piloti ne ishode dozvolu

što onda može rezultirati nagađanjima. Pametna tehnologija te upotreba bespilotnih letjelica predstavlja potencijalno rješenje tog problema. Uz objektivnost, prednost ovih sustava je i to što mogu pokriti velika područja u vrlo kratkom vremenu i mogu se programirati da na isto mjesto dolaze nakon određenog razdoblja, što proces pregleda konstrukcije čini ponovljivim. Također, povećava se sigurnost osoba koje obavljaju pregled konstrukcije. Dakle, upotreba ovakvih sustava omogućava preciznije izvještavanje, štedi vrijeme i povećava učinkovitost upravljanja kapacitetom konstrukcije. Osim toga, dobivanjem visokokvalitetnih fotografija i videozapisa, osobe koje obavljaju pregled konstrukcije mogu procijeniti njeno stanje bez upotrebe dodatne opreme poput platformi, radnih skela, specijalnih vozila i sl. Osim svojih prednosti, upotreba bespilotnih letjelica uključuje i različite tehničke izazove. Oni uključuju ograničeno vrijeme trajanja rada izvora napajanja, ograničenu sposobnost pregleda konstrukcijskih dijelova koji se nalaze iznad putanje letenja gdje dolazi do ometanja rada kompasa i GNSS signala koji kontroliraju let bespilotne letjelice. Također, jedan od nedostataka predstavlja

naknadna analiza podataka koje letjelica tijekom pregleda prikupi. Osim spomenutog, nedostatak i poteškoću prilikom analize prikupljenih podataka predstavljaju i različiti utjecaji iz okoline poput osvjetljenja, sjene, vjetrova i dr. [38] te dimenzije pojedinih elemenata [39] koji mogu biti uski i dugi i prilikom analize stvaraju dojam postojanja pukotina na elementima mosta. Izazov predstavljaju zakoni i propisi o zračnom prostoru te dobivanje certifikata za upravljanje bespilotnim letjelicama [40].

4. Pravila i postupci za rad i upravljanje bespilotnim letjelicama

Europska komisija koja uređuje područje bespilotnih letjelica izdala je uredbe koje su stupile na snagu u srpnju 2019. godine. Uredbe se odnose na pravila i postupke za rad bespilotnih letjelica [41] te na uredbe o sustavima bespilotnih letjelica i o operatorima sustava bespilotnih letjelica iz trećih zemalja [42]. Izdana uredba je početkom 2021. godine stupila na snagu u Republici Hrvatskoj. Prema izdanim uredbama, operacije

Tablica 3. Kategorije i zahtjevi za operacije sustavima bespilotnih zrakoplova [43]

Potkategorija	Područje operacija	Klasa	Masa/ brzina/ energija	Ograničenost
A1	Let iznad neuključenih pojedinaca	Samoizgradnja	< 250 g i < 19 m/s	
		Stavljene na tržište prije 1.7.2022.	< 250 g	
		C0	< 250 g i < 19 m/s	
	Zabrana letenja iznad neuključenih pojedinaca	C1	< 900 g ili < 80 J	
		A1 tranzicijski	< 500 g	Prelaze u A3 kategoriju nakon 30.6.2020
A2	Horizontalna udaljenost od neuključenih pojedinaca najmanje 30 m	C2	< 4 kg	Prelaze u A3 kategoriju nakon 30.6.2022.
	Horizontalna udaljenost od neuključenih pojedinaca najmanje 50 m	A2 tranzicijski	< 2 kg	
A3	Neuključene osobe ne smiju biti prisutne kada se izvode letačke operacije	C3		
		C4		
	Horizontalna udaljenost od naseljenih područja najmanje 150m	Samoizgradnja	< 25 kg	
		Stavljeni na tržište prije 1.7.2020.		
	A3 tranzicijski	2 kg < M < 25 kg		

bespilotnih letjelica dijele se u tri kategorije: otvorena, posebna i certificirana (tablica 2.)

Letačke operacije koje se svrstavaju u operacije otvorene kategorije moraju zadovoljiti tri glavna uvjeta navedena u tablici 2. (najveća operativna masa < 25 kg, upravljanje bespilotnom letjelicom unutar vidnog polja, maksimalna visina od 120 m od najbliže točke na kojoj letjelica može letjeti). Ako jedan od tih triju uvjeta nije zadovoljen, letačke se operacije izvode u skladu sa zahtjevima druge, posebne kategorije. Otvorena kategorija letačkih operacija dijeli se u 3 potkategorije (tablica 3.).

Sve navedene potkategorije otvorenih letačkih operacija zahtijevaju registraciju operatora, minimalnu dob udaljenog pilota od 16 godina te online osposobljavanje i online ispit teorijskog znanja. Potkategorija A2, osim toga, zahtijeva i samoprakčno osposobljavanje i dodatni ispit teorijskog znanja. Za sve potkategorije područje letačkih operacija ograničeno je na maksimalnu visinu od 120 m, tijekom leta je zabranjeno izbacivanje bilo kakvih predmeta i prijevoz opasne robe. Odobrenje za izvođenje letačkih operacija u posebnoj kategoriji izdaje Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo na temelju izrađene procjene operativnog rizika od strane operatora (eng. *Specific Operation Risk Assessment - SORA*) ili unaprijed definirane procjene rizika koje je izdala Europska komisija (eng. PDRA). Za letačke operacije u posebnoj kategoriji koje se izvode po standardnom scenariju odobrenom od Europske komisije nije potrebno ishoditi operativno odobrenje već je operater dužan prije početka izvođenja operacije izjavom obavijestiti nadležno tijelo državne uprave. Zasad postoje dva odobrena standardna scenarija koji pokrivaju izvođenje letačkih operacija

bespilotnim zrakoplovima mase do 25 kg na visini do 120 m u naseljenom području te slabo naseljenom području izvan vidnog polja operatora u radijusu do 2 km. Ako operator posjeduje Lagani certifikat UAS operatora (eng. *Light Unmanned Aircraft Certificate - LUC*), omogućeno mu je samoodobranje operacija u posebnoj kategoriji na temelju procjene rizika bez ishođenja operativnog odobrenja [41]. S obzirom na poziciju, lokaciju i smještaj građevina prometne infrastrukture, njihov pregled upotrebom bespilotnih zrakoplova, prema novom pravilniku pripadao bi otvorenoj kategoriji (potkategorija A2/ A3, ovisno o masi letjelice), odnosno posebnoj kategoriji. Kako bi se ostvarila standardizacija bespilotnih zrakoplova na tržištu Europske unije, prema izdanim uredbama bespilotni zrakoplovi se dijele u pet klasa (tablica 3.) koje su direktno povezane sa potkategorijom odnosno kategorijom letačke operacije. To su klase C0, C1, C2, C3, C4. Izdanim odredbama Europske unije također se uvodi i zahtjev za registracijom koji se nadovezuje na zahtjeve prema kojima bespilotni zrakoplov podložan certificiranju mora biti registriran te na zahtjev prema kojemu operatori moraju biti registrirani ako izvode letačke operacije s bespilotnim zrakoplovima čija je operativna masa najmanje 250g, koji mogu preneti 80J kinetičke energije na čovjeka ako dođe do kontakta (sudara) s njim, čije upravljanje predstavlja rizik za privatnost, zaštitu osobnih podataka, sigurnost ili okoliš. Iz navedenih zahtjeva proizašla je podjela letačkih operacija (tablica 2.). U otvorenoj i posebnoj kategoriji letačkih operacija operator mora biti registriran, dok za certificirane letačke operacije bespilotni zrakoplov mora biti registriran. Što se tiče obveze osiguranja od odgovornosti, ona ne postoji za bespilotne zrakoplove s manje

od 20 kg ako su namijenjeni za sport i rekreaciju. Ako je u pitanju izvođenje letačkih operacija, komercijalnih ili nekomercijalnih, obveza osiguranja od odgovornosti postoji neovisno o najvećoj dopuštenoj masi pri polijetanju.

5. Zaključak

Klasični pristupi i metode ocjene stanja infrastrukturnih građevina i dalje su uobičajena praksa koja se smatra vrlo pouzdanom, iako se u ovom području posljednjih godina sve više pojavljuju i različiti autonomni sustavi. U radu je naglasak stavljen na mostove kao ključne elemente prometne infrastrukture te je uz analizu pristupa i metoda ocjene njihova stanja provedena i analiza stanja područja relevantne regulative u Republici Hrvatskoj. Pregledom relevantne regulative može se utvrditi neujednačenost u vremenskim periodima provedbe glavnih pregleda mostova. Naime, prema Zakonu o gradnji (i povezanom Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije), oni se provode svakih pet godina, a prema Zakonu o cestama (i povezanom Pravilniku o održavanju cesta) nalaže se njihova provedba svakih 6 godina. Kao ključni nedostaci klasičnog pristupa i metoda ocjene stanja mostova ističu se nesigurnost za ispitivače i korisnike, zahtjevi za upotrebom skupe dodatne opreme i trajanje pregleda te analize podataka. Primjenom autonomnih sustava bespilotnih letjelica mogu se svladati

nedostaci klasičnih pristupa i metoda ocjene stanja mostova. Na taj način stvara se sustav koji je objektivan, ponovljiv i precizan. U radu je dan pregled dosadašnjih rješenja bespilotnih letjelica koje su primjenjivane u ovakve svrhe. Daljnji razvoj algoritama upravljanja i navigacije omogućit će potpuno autonomno izvođenje inspekcije mostova bez potrebe za operatorima koji upravljaju bespilotnom letjelicom ili sustavom kamera. Također, razvojem algoritama za lokalizaciju letjelice u prostoru koji se u većoj mjeri oslanja na podatke dobivene iz vizualnih senzora i LiDAR-a bit će moguće otklanjanje uočenih problema koji nastaju zbog utjecaja metalnih dijelova konstrukcije mostova na mjerenja magnetometra. Odgovarajuća kombinacija sustava upravljanja i senzora može osigurati sveobuhvatnu ocjenu stanja mostova, a sve uz smanjene troškove, povećanu brzinu ispitivanja te kvalitetniju i precizniju analizu rezultata. Time se osigurava sigurnije i kvalitetnije upravljanje važnim infrastrukturnim građevinama kao što su mostovi.

Zahvala

Ovo istraživanje dio je znanstvenog projekta "Autonomni sustav za pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture (ASAP)" financiran od strane Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj u sklopu poziva Ulaganje u znanost i inovacije – prvi poziv KK.01.1.1.04.

LITERATURA

- [1] Henriques, M.J., Roque, D.: Unmanned aerial vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams, Second international Dam World Conference, Lisbon, 2015.
- [2] Pravilnik o ispitivanju mostova pokusnim opterećenjem (2005): norma HRN U.M1.046
- [3] Rothman, S.J.: Experimental Techniques for the Measurement of Diffusion Coefficients, *Diffusion in Materials*, 179 (1990), pp.269–286, doi: 10.1007/978-94-009-1976-1_10
- [4] Scanning Laser Doppler Vibrometer: <https://www.optomet.com/products/scanning-vibrometers/> (accessed February 26, 2020).
- [5] Haberman, C.: A Disaster Brought Awareness but Little Action on Infrastructure - The New York Times, <https://www.nytimes.com/2014/03/03/us/a-disaster-brings-awareness-but-little-action-on-infrastructure.html>, 14.02.2020.
- [6] Bridge Failures: List of the Most Famous Bridge Disasters, <http://www.historyofbridges.com/facts-about-bridges/bridge-failures/>, 14.02.2020.
- [7] State of Minnesota: Bridge and Structure Inspection Program Manual, Department of transportation, Svibanj 2019.
- [8] Ponte Morandi bridge collapses in Genoa during storm: <https://www.dezeen.com/2018/08/15/ponte-morandi-bridge-collapse-geoa-riccardo-morandi/>, 30.04.2020.
- [9] Hrelja Kovačević, G., Srbić, M., Mandić Ivanković, A.: Seismic performance of existing bridges in Croatia – shortcomings, hidden reserves and vulnerability assessment perspective, 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering (1CroCEE), Zagreb, pp. 1161-1164, 2021., <https://doi.org/10.5592/CO/1CroCEE.2021.141>
- [10] Zakon o gradnji (Narodne novine, 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)
- [11] Tehnički propis za građevinske konstrukcije (Narodne novine, 17/2017)
- [12] Zakon o cestama (Narodne novine, 92/14)
- [13] Pravilnik o održavanju i zaštiti javnih cesta (Narodne novine, 90/2014)
- [14] Latorella, K.A., Prabhu, P.V.: A review of human error in aviation maintenance and inspection, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26 (2000), p.p. 521–49, [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(99\)00063-3](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00063-3)
- [15] Kanellakis, C., Fresk, E., Mansouri, S.S., Kominiak, D., Nikolakopoulos, G.: Autonomous visual inspection of large-scale infrastructures using aerial robots, Cornell University, Computer Science, Robotics, 2019., arXiv:1901.05510v1
- [16] Pere, R., Marc, C., David, R., Garci, R.: Visual Inspection of Hydroelectric Dams Using an Autonomous Underwater Vehicle, *Journal of Field Robotics*, 27 (2010) 6, p.p. 759–778, <https://doi.org/10.1002/rob.20351>

- [17] Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C., Siegwart, R.: A UAV system for inspection of industrial facilities. *IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky*, pp. 1-8, 2013., <https://doi.org/10.1109/AERO.2013.6496959>
- [18] Kaszowska, O., Gruchlik, P., Mika, W.: Industrial chimney monitoring - Contemporary methods, *E3S Web of Conferences* 36, Kraków, pp.1-8, 2018., <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183601005>
- [19] Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (Narodne novine, 104/2018)
- [20] Lenta vremena Nikole Tesle | Memorijalni centar „Nikola Tesla” Smiljan <https://mcnikolatesla.hr/lenta-vremena-nikole-tesle/>, 17.06.2020.
- [21] Hrvatska tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/bespilotna-letjelica/>, 18.06.2020.
- [22] Ashour, R., Taha, T., Mohamed, F., Hableel, E., Kheil, Y.A., Elsalamouny, M., et al.: Site inspection drone: A solution for inspecting and regulating construction sites, 2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Abu Dhabi, 2016, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2016.7870116>
- [23] Ham, Y., Han, K.K., Lin, J.J., Golparvar-Fard, M.: Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works, *Visualization in Engineering*, 4 (2016) 4, pp. 1-8, <https://link.springer.com/article/10.1186%2Fs40327-015-0029-z>
- [24] Casado, M.R., Gonzalez, R.B., Kriechbaumer, T., Veal, A.: Automated identification of river hydromorphological features using UAV high resolution aerial imagery, *Sensors*, 15 (2015) 11, pp. 27969-27989, <https://doi.org/10.3390/s151127969>
- [25] Kačunić D.J., Librić L., Car M.: Primjena bespilotnih letjelica na prometnoj infrastrukturnoj mreži, *Građevinar*, 68 (2016) 4, pp. 287-300, <https://doi.org/10.14256/JCE.1382.2015>
- [26] Ikeda, T., Yasui, S., Fujihara, M., Ohara, K., Ashizawa, S., Ichikawa, A., et al.: Wall contact by octo-rotor UAV with one DoF manipulator for bridge inspection. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5122-5127, 2017, <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206398>
- [27] Ayele, Y.Z., Aliyari, M., Griffiths, D., Droguett, E.L.: Automatic crack segmentation for uav-assisted bridge inspectio, *Energies*, 13 (2020) 23, pp. 1-16, <https://doi.org/10.3390/en13236250>
- [28] Zrinjski, M., Tupek, A., Polović, A., Barković, Đ.: Ispitivanje i analiza vertikalnosti dimnjaka, *Geodetski List*, 73 (2019) 96, pp. 239-260, <https://hrcak.srce.hr/227002>
- [29] Car, M., Marković, L., Ivanović, A., Orsag, M., Bogdan, S.: Autonomous Wind-Turbine Blade Inspection Using LiDAR-Equipped Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE Access*, 8 (2020), pp. 131380-7, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009738>
- [30] Mac, T.T., Copot, C., Hernandez, A., De Keyser, R.: Improved potential field method for unknown obstacle avoidance using UAV in indoor environment. *SAMI 2016 - IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics - Proceedings*, pp. 345-350, 2016., <https://doi.org/10.1109/SAMI.2016.7423032>
- [31] Dorafshan, S., Maguire, M.: Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8 (2018), pp.443-476, <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0285-4>
- [32] Paneque, J.L., Martinez-De Dios, J.R., Ollero, A.: Multi-Sensor 6-DoF Localization for Aerial Robots in Complex GNSS-Denied Environments. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1978-1984, <https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8967686>
- [33] González-Partida, J.T., Almorox-González, P., Burgos-García, M., Dorta-Naranjo, B.P.: SAR system for UAV operation with motion error compensation beyond the resolution cell, *Sensors*, 8 (2008), pp. 3384-3405, <https://doi.org/10.3390/s8053384>
- [34] Remy, M.A., de Macedo, K.A.C., Moreira, J.R.: The first UAV-based P- and X- band interferometric SAR system, 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, pp. 5041-5044, 2012., <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352478>
- [35] Pajares, G.: Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs), *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81 (2015) 4, pp. 281-330, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>
- [36] Roldán, J.J., Joossen, G., Sanz, D., Del Cerro, J., Barrientos, A.: Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses, *Sensors*, 15 (2015) 2, pp. 3334-3350, <https://doi.org/10.3390/s150203334>
- [37] Irizarry, J., Johnson, E.N.: Final Report: Feasibility Study to Determine the Economic and Operational Benefits of Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Georgia DOT Research Project 12-38, 2014.
- [38] Lei, B., Wang, N., Xu, P., Song, G.: New Crack Detection Method for Bridge Inspection Using UAV Incorporating Image Processing, *Journal of Aerospace Engineering*, 31 (2018) 5, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)as.1943-5525.0000879](https://doi.org/10.1061/(asce)as.1943-5525.0000879)
- [39] Chen, S., Laefer, D.F., Mangina, E., Zolanvari, S.M.I., Byrne, J.: UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions, *Journal of Bridge Engineering*, 24 (2019) 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343)
- [40] Zink, J., Lovelace, B.: Final Report: Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project, Minnesota Department of Transportation, Research Project, 2015.
- [41] O pravilima i postupcima za rad bespilotnih zrakoplova (Provedbena uredba komisije (EU) 2019/947)
- [42] O sustavima bespilotnih zrakoplova i o operatorima sustava bespilotnih zrakoplova iz trećih zemalja (Delegirana uredba komisije (EU) 2019/945)
- [43] EU UAS regulacijski paket, http://www.ccaa.hr/file_inline.php?file=638fd62915172c429e101c3e9410af3f078, 13.1.2021.