

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Petar Brizić

**DIGITALNI DVOJNICI I APLIKACIJE**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

Petar Brizić ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2022.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GEODETSKI FAKULTET**

Petar Brizić

**KONCEPT DIGITALNIH DVOJNIKA I**  
**APLIKACIJE**

Diplomski rad

Zagreb, 2021

# SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

## GEODETSKI FAKULTET



Na temelju članka 19. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu i Odluke br. 1\_349\_11 Fakultetskog vijeća Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, od 26.10.2017. godine (klasa: 643-03/16-07/03), uređena je obaveza davanja „Izjave o izvornosti“ diplomskog rada koji se vrednuju na diplomskom studiju geodezije i geoinformatike, a u svrhu potvrđivanja da je rad izvorni rezultat rada studenata te da taj rad ne sadržava druge izvore osim onih koji su u njima navedeni.

### IZJAVLJUJEM

Ja, **Petar Brizić**, (JMBAG: 0007179698), rođen dana 10.10.1997. u Splitu, izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi tog rada nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta / studentice*

<b>I. AUTOR</b>	
<b>Ime i prezime:</b>	Petar Brizić
<b>Datum i mjesto rođenja:</b>	10. listopada 1997., Split, Republika Hrvatska
<b>II. DIPLOMSKI RAD</b>	
<b>Naslov:</b>	Koncept digitalnih dvojnika i aplikacije
<b>Broj stranica:</b>	61
<b>Broj tablica:</b>	0
<b>Broj slika:</b>	49
<b>Broj bibliografskih podataka:</b>	16 + 13 URL-a
<b>Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:</b>	Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Željko Bačić
<b>Komentor:</b>	
<b>Voditelj:</b>	Zvonimir Nevistić, mag. ing. geod. et geoinf.
<b>III. OCJENA I OBRANA</b>	
<b>Datum zadavanja teme:</b>	18.01.2021.
<b>Datum obrane rada:</b>	25.02.2021.
<b>Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:</b>	prof. dr. sc. Željko Bačić
	izv. prof. dr. sc. Vesna Poslončec-Petrić
	izv. prof. dr. sc. Andrija Krtalić

## **Zahvala**

*Zahvaljujem mentoru , prof. dr. sc. Željku Bačiću na stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada. Također zahvaljujem voditelju, mag. ing. geod. et geoinf. Zvonimiru Nevistiću na njegovoj pomoći tijekom čitavog procesa pisanja rada.*

*Zahvaljujem se tvrtki „Bentley“ što je omogućila pristup njihovom softveru za izradu digitalnog dvojnika.*

*Hvala mojoj obitelji koja mi je pružila podršku za vrijeme studija te svim prijateljima bez kojih ovaj period života ne bi bio isti.*

### **Koncept digitalnih dvojnika i aplikacije**

**Sažetak:** Koncept digitalnih dvojnika danas sve više postaje jedan od vodećih trendova u tehnološkom sektoru te ga se često naziva predvodnikom predvodnik četvrte industrijske revolucije. Ovaj koncept predstavlja virtualnu repliku živućeg ili ne živućeg entiteta, procesa ili sustava. "Digitalni dvojnici" kao pojam pojavljuje se 2002. godine, a NASA je prva realizirala takvu ideju još 60-ih godina 20. stoljeća simulirajući uvjete na letjelici „Apollo 13”. Digitalni dvojnici usporedivi su s konceptom BIM-a i 3D modelima, ali su ipak bitno drugačiji. Za razliku od njih, imaju dimenziju vremena, odnosno primjenjivi su tijekom čitavog životnog ciklusa nekog entiteta. Ovim konceptom sjedinjuje se „Internet of things” i napredna analiza podataka . Prikupljanjem podataka u stvarnom vremenu pomoću različitih senzora, digitalni dvojnici omogućuje praćenje stanja nekog entiteta u svakom trenutku. Takav pristup kontinuiranog praćenja rezultira produljenjem životnog vijeka entiteta te omogućuje njegovu konstantnu optimizaciju. Naravno, proces uspostave zahtjeva stručno znanje te mnogobrojne alate. Digitalni dvojnici susreću se s mnogim izazovima koje je potrebno riješiti kako bi se ovaj koncept implementirao i stekao što veće povjerenje među potencijalnim korisnicima. U svijetu se ova tehnologija danas primjenjuje u mnogobrojnim sektorima. Izrađuju se digitalni dvojnici proizvodnih lanaca, tehnoloških proizvoda, plovila pa čak i ljudskih organa. Posebno je zanimljiva činjenica da je u tijeku proces izrade kompletnog digitalnog dvojnika planete Zemlje. Geoprostorna industrija također je zahvaćena ovim trendom, a digitalni rudnici, pametni gradovi, praćenje stanja na gradilištu te inspekcija objekata samo su neki od primjera primjene ovog novog koncepta u njoj. Singapur je prvi grad koji je izradio vlastitog digitalnog dvojnika, a očekuje se da će za početak i ostale metropole popratiti taj trend. Cilj ovog diplomskog rada bio je istražiti koncept digitalnih dvojnika i njegove primjene, praktični dio ovog istraživanja sastojao se od izrade digitalnog dvojnika silosa Resnik koji se nalazi na području grada Zagreba. Alat korišten prilikom izrade ovog rada bio je „ContextCapture” tvrtke „Bentley” koja je omogućila pristup njihovom softveru. Očekuje se da će u bliskoj budućnosti postojati mnogobrojni primjeri digitalnih dvojnika koji će omogućiti lakše upravljanje entitetima, procesima te sustavima pri čemu će se potencijalno uštedjeti milijarde dolara. Očekuje se da će tržište digitalnih dvojnika, koje je 2020-e godine vrijedilo 3,1 milijardu američkih dolara, dostići vrijednost u iznosu od 48,2 milijarde do 2026-e godine.

**Ključne riječi:** Digitalni dvojnici, aplikacije, Bentley, ContextCapture

### ***The concept of digital twins and applications***

**Abstract:** *Today, the concept of digital twins is increasingly becoming one of the leading trends in the technology sector and is often called the leader of the fourth industrial revolution. This concept is a virtual replica of a living or non-living entity, process or system. "Digital twin" as a term appeared in 2002 and NASA was the first to realize such an idea in the 60's of the 20th century by simulating the conditions on the spacecraft "Apollo 13". Digital twins are comparable to the BIM concept 3D models, but they are still significantly different. In contrast, they have a time dimension and they are applicable during the entire life cycle of an entity. This concept combines the „Internet of things" and advanced data analysis. By collecting real-time data using various sensors, the digital twin allows you to monitor the state of entity at any time. Such an approach of continuous monitoring results in extending the life of the entity and enables its constant optimization. Of course, the establishment process requires expertise and numerous tools. Digital twins face many challenges that need to be addressed in order to implement this concept and gain as much trust as possible among potential users. Worldwide, this technology is applied in many sectors today. Digital twins of production chains, technological products, vessels and even human organs are being duplicated. Of particular interest is the fact that the process of creating a complete digital twin of the planet Earth is underway. The geospatial industry is also affected by this trend. Digital mines, smart cities, site monitoring and facility inspections are just some examples of the application of this new concept in it. Singapore is the first city to create its own digital twin and other big cities are expected to follow this trend. The idea of this work was to investigate the concept of digital twin and its applications. The practical part of this research is consisted of the creation of a digital twin of silo Resnik, located in the city of Zagreb. The tool used to create it was Bentley's ContextCapture software. It is expected that there will be many examples of digital twins in the near future. They will make it easier to manage entities, processes and systems, potentially saving billions of dollars. The digital twin market, which was worth \$3.1 billion in 2020, is expected to reach a value of \$48.2 billion by 2026.*

**Keywords:** *Digital twins, applications, Bentley, ContextCapture*

## SADRŽAJ

POPIS KRATICA .....	1
1. UVOD .....	2
2. DIGITALNI DVOJNICI .....	3
2.1 POVIJEST DIGITALNIH DVOJNIKA .....	3
2.2 KONCEPT DIGITALNIH DVOJNIKA.....	5
2.3 IZAZOVI USPOSTAVE DIGITALNIH DVOJNIKA.....	6
2.4 USPOREDBA DIGITALNIH DVOJNIKA, BIM-A I 3D CAD MODELA.....	7
3. PREGLED UPORABE DIGITALNIH DVOJNIKA U SVIJETU .....	10
3.1 DIGITALNI DVOJNIK ZEMLJE .....	10
3.2 PRIMJENA DIGITALNIH DVOJNIKA U RAZLIČITIM SEKTORIMA .....	13
3.2.1 Primjena digitalnih dvojnika u proizvodnom lancu .....	13
3.2.2 Primjena digitalnih dvojnika u zdravstvenom sektoru.....	15
3.2.3 Primjena digitalnih dvojnika u energetskom sektoru.....	17
3.2.4 Primjena digitalnih dvojnika u pomorskom sektoru .....	18
3.2.5 Primjena digitalnih dvojnika u geoprostornoj industriji .....	20
4. ALATI I PODACI POTREBNI ZA USPOSTAVU DVOJNIKA .....	26
4.1 ALATI ZA SPOZNAJU I KONTROLIRANJE FIZIČKOG SVIJETA.....	26
4.2 ALATI ZA MODELIRANJE DIGITALNIH DVOJNIKA.....	27
4.3 ALATI ZA UPRAVLJANJE PODACIMA DIGITALNIH DVOJNIKA .....	29
4.4 ALATI ZA PRIMJENU USLUGA DIGITALNIH DVOJNIKA .....	30
4.5 ALATI ZA UMREŽAVANJE DIGITALNIH DVOJNIKA .....	32
5. CONTEXTCAPTURE CONNECT EDITION .....	33
5.1 OPIS SOFTVERA CONTEXTCAPTURE .....	33
5.2 PREPORUKE ZA PRIKUPLJANJE ULAZNIH PODATAKA .....	35
5.3 IZRADA TESTNOG PRIMJERKA DIGITALNOG DVOJNIKA RADIO UREĐAJA .....	37
6. USPOSTAVA DIGITALNOG DVOJNIKA SILOSA .....	42
6.1 OBJEKT ISTRAŽIVANJA I KORIŠTEN INSTRUMENTARIJ .....	42
6.2 USPOSTAVA DIGITALNOG DVOJNIKA SILOSA .....	44
6.3 INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA .....	54
7. ZAKLJUČAK .....	57
LITERATURA:.....	58

---

POPIS SLIKA ..... 60

## POPIS KRATICA

AVI Audio Video Interleave

BIM Building information model

CDE Common data environment

CMOS Complementary Metal Oxide Sensors

CNC Computer numerical control

CSIRO The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

CT Computerised tomography

DestinE Destination Earth

DJI Da- Jiang Innovations

DPI NSW Department of Primary Industries

DSLR Digital single-lens reflex

ERP Enterprise Resource Planning

EXIF Exchangeable image file

GPS Global Positioning System

IOT Internet of things

IT Information technology

LIDAR Light detection and ranging

NASA The National Aeronautics and Space Administration

NRF National Research Foundation

RAM Random-access memory

ROS Robot operating system

SDT NSW Spatial digital twin

VR Virtual Reality

WAN Wide area network

WGS84 World Geodetic System 84

WMV Windows Media Video

WSN Wireless sensor network

## 1. UVOD

Digitalni dvojnici su koncept i tehnologija koji predstavljaju vodeći trend u (geo-prostornom) tehnološkom sektoru. „ Na simpoziju korporacije Gartner (2017), Cearley je ustvrdio da će digitalni dvojnici postojati za milijarde stvari u bliskoj budućnosti. Na stolu su potencijalno milijarde dolara uštede u popravcima i održavanju imovine te optimiziranje njenih performansi.“ Drugim riječima, digitalni dvojnici nude podršku u upravljanju entitetima. Daju nam podatke o njihovoj operativnoj učinkovitosti. Omogućuju nam uvidjeti na koji način se koriste te kako ih možemo unaprijediti. Mnoge kompanije već koriste ovu tehnologiju kako bi uočili probleme i povećali učinkovitost.

Digitalni dvojnik virtualna je replika živućeg ili ne živućeg fizičkog entiteta, procesa ili sustava. Proces uspostave temelji se na prikupljanju podataka u stvarnom vremenu pomoću senzora. Na temelju prikupljenih podataka omogućeno je kreiranje dvojnika, odnosno postojanje fizičkog i virtualnog entiteta u istom trenutku. Takav pristup omogućuje praćenje entiteta tijekom cijelog životnog ciklusa.

Očekivano je da digitalni dvojnici produže životni vijek entiteta. Replicirani entitet može se bolje razumjeti, analizirati, manipulirati te optimizirati. Kada govorimo o tome kako se neki objekt mijenja tijekom vremena, zadaća digitalnog dvojnika je spajanje fizičkog i digitalnog svijeta u jedno. Ta ideja čini ovu tehnologiju inovativnom. Digitalni dvojnik treba imati dimenziju vremena, ali i kontekst.

Cilj ovog istraživanja jest steći znanja i spoznaje za uspostavu digitalnih dvojnika, što bi bilo primjenjivo u geodeziji i geoinformatici. Uvodni dio ovog istraživanja odnosi se na upoznavanje s pojmom 'digitalni dvojnik'. Navedeno je kada je ovaj pojam prvi puta službeno upotrijebljen te koja je njegova prva primjena. Digitalni dvojnici imaju dodirnih točaka sa sličnim tehnologijama, kao što je primjerice „Building information modeling" (BIM). U jednom dijelu rada opisano je po čemu se digitalni dvojnici razlikuju od drugih tehnologija koje su u trendu, odnosno što je to novo što oni donose.

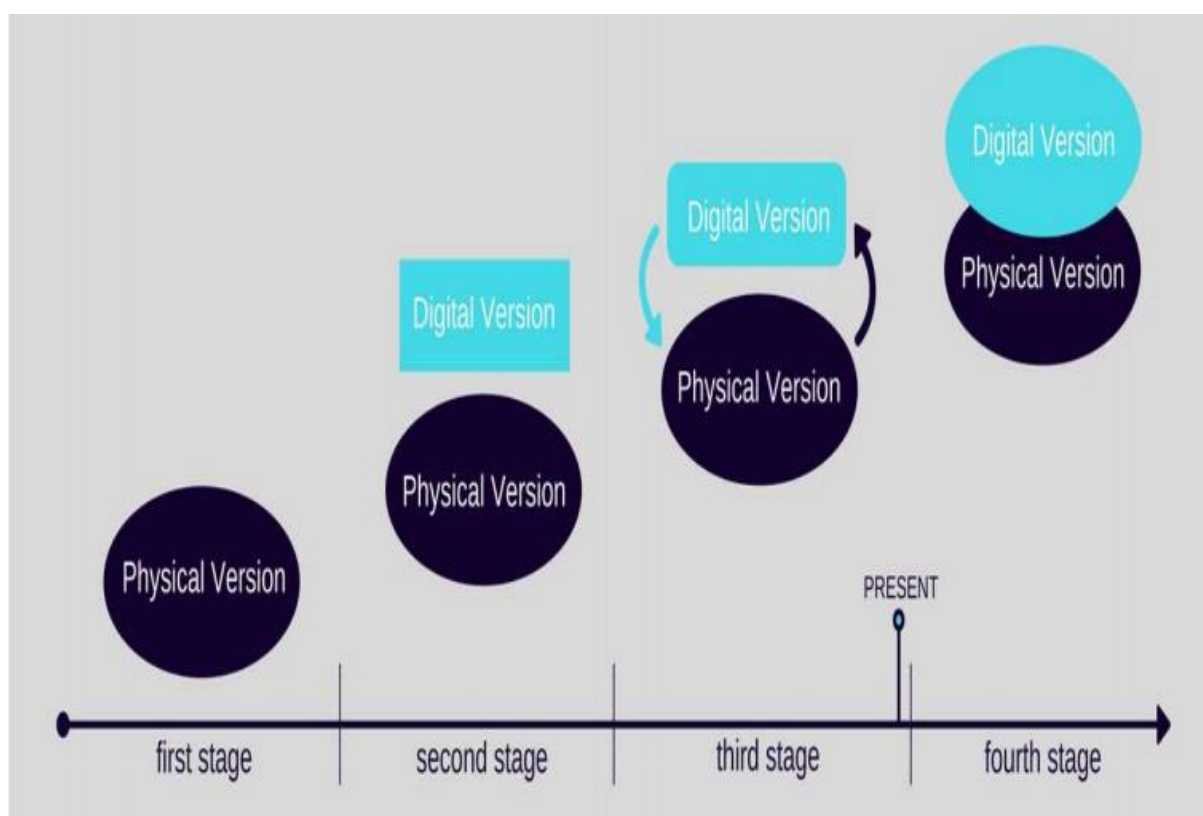
Budući da ova tehnologija nije još naišla na značajniju primjenu na našim prostorima, problem uoči izrade praktičnog dijela ovog rada bio je pronaći te se upoznati s alatima potrebnim za njegovu izradu. Tvrtka „Bentley Systems“ ustupila je softver „ContextCapture CONNECT Edition“ koji je iskorišten za izradu praktičnog dijela ovog istraživanja. Prije izrade praktičnog dijela projekta, izrađen je testni primjerak u svrhu boljeg upoznavanja sa softverom te ispitivanja njegovih mogućnosti.

Kao objekt snimanja odabran je silos Resnik na području grada Zagreba, a alat za prikupljanje podataka bio je dron. Također je bio izazov odrediti s kojom razinom detalja je potrebno snimiti objekt, a da pri tome konačno rješenje bude maksimalno iskoristivo za analizu. Na temelju dobivenih rezultata, izvršena je analiza te je opisano na koji način bi dobiveni rezultati mogli biti iskorišteni u geoprostornoj industriji.

## 2. DIGITALNI DVOJNICI

### 2.1 POVIJEST DIGITALNIH DVOJNIKA

Koncept digitalnih dvojnika prvi puta je predstavljen 2002. godine. Udruga za poslovno savjetovanje SAD-a „Challenge Advisory” ugostila je Michaela Grievesa na Sveučilištu Michigan. Grieves je održao prezentaciju na temu razvoja centra za upravljanje nad proizvodom tijekom njegovog životnog ciklusa. Prezentacija je sadržavala elemente koje vezemo uz digitalne dvojnike, kao što su: stvarni svijet, digitalni svijet te protok informacija između ta dva svijeta. Iako se terminologija tijekom vremena možda mijenjala, ideja spajanja fizičkog i digitalnog u jedno ostala je ista.

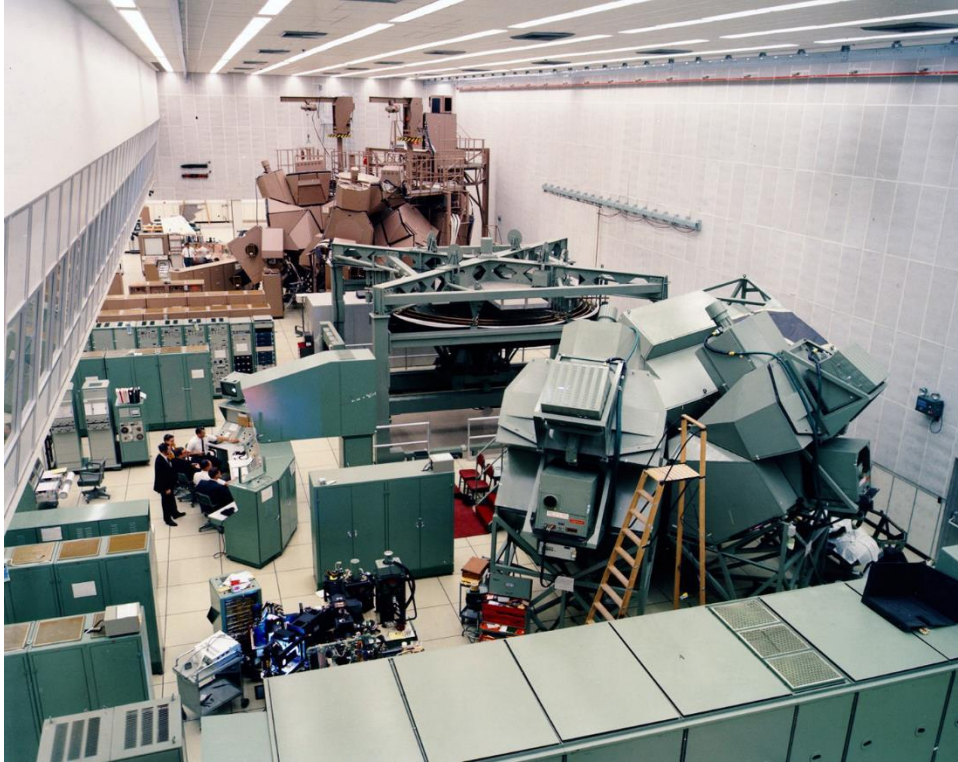


Slika 2.1 Koncept ideje o integraciji fizičkog i digitalnog svijeta (Miskins, 2016)

Iako su digitalni dvojnici kao pojam poznati od početka drugog tisućljeća, koncept se koristi još od 1960-ih. Američka svemirska agencija „The National Aeronautics and Space Administration” (NASA) koristila je tehnologiju repliciranja, odnosno simulacije uvjeta, tijekom njihovog svemirskog programa. To su postigli tako što su kreirali fizičke replike koje su odgovarale sustavima u svemiru te su nad njima vršili različite simulacije.

Digitalni dvojnik letjelice Apollo 13 primjer je „NASA-ine” primjene ove tehnologije. Poslužio im je za procjenu i simulaciju uvjeta na letjelici u svemiru, što je naposljetku odigralo ključnu ulogu u spašavanju ljudskih života.

Nakon što je „Apollo 13” lansiran u travnju 1970. godine, nitko nije mogao predvidjeti da će spremnici s kisikom eksplodirati te da će astronauti biti u bitci za život. Situacija je zahtijevala rješavanje tehničkih problema letjelice od strane inženjera, iako su bili udaljeni 200 000 milja od nje. Ključnu ulogu u spašavanju odigrao je digitalni dvojniki „Apollo 13” koji je omogućio inženjerima da testiraju moguća rješenja na Zemlji.



*Slika 2.2 Fizička replika sustava letjelice „Apollo 13” (URL 1)*

Većina modernih digitalnih dvojnika ima stalnu komunikaciju u vidu razmjene podataka s udaljenim stvarnim objektom. Komunikacija podataka služi za ažuriranje kompjutorskih modela kako bi bili u skladu sa stvarnim stanjem. Prikupljanje podataka s letjelice bio je lakši dio posla. Problem je bio obraditi podatke tako da oni budu iskoristivi za donošenje odluka u stvarnom vremenu. Taj potreban vremenski period za obradu podataka izazov je i današnjim digitalnim dvojnima. Usprkos ovim ograničenjima, inženjeri su bili u stanju provoditi ispravne i pravovremene odluke. Također, rješenja do kojih su došli prilikom simulacija, uspjeli su primijeniti na letjelicu u svemiru. Mogućnost provođenja ispitivanja nad modelom te primjena kvalitetnih rješenja na stvarni svijet jedna su od ključnih ideja digitalnih dvojnika.

## 2.2 KONCEPT DIGITALNIH DVOJNIKA

Industrija i akademska zajednica definiraju digitalnog dvojnika na više različitih načina. Međutim, nijedna zajednica ne stavlja potreban naglasak na aspekte procesa digitalnog dvojnika. Primjerice, neki tvrde da je digitalni dvojnik integrirani model proizvoda u izradi koji prikazuje sve defekte nastale u procesu izrade te je konstantno ažuriran podacima o njegovom stanju tijekom uporabe. Druge definicije opisuju digitalnog dvojnika kao senzorski-omogućeni digitalni model fizičkog objekta koji simulira životni proces toga objekta. U osnovi, digitalni dvojnik može biti definiran kao razvijajući digitalni profil povijesnog i aktualnog stanja fizičkog objekta ili procesa koji omogućuje optimiziranje poslovnog učinka (Fuller i dr.).

Digitalni dvojnik perjanica je četvrte industrijske revolucije koji spaja naprednu analizu podataka te „Internet of things“ (IoT). IoT je znatno povećao volumen korisnih podataka primjenjivih u različitim granama industrije. Taj bogati sustav podataka koju IoT pruža u kombinaciji s naprednom analizom podataka jedan je od temelja digitalnih dvojnika. Sinergija tih dvaju elemenata pruža nam esencijalne resurse korisne za predvidivo održavanje nekog entiteta te detekciju anomalija. Dvojnik nam omogućuje brzu analizu te donošenje odluka u realnom vremenu na temelju izvršene analize podataka. Podaci moraju imati jednostavan pristup te moraju biti ažurirani i točni! Stvarna snaga digitalnog dvojnika jest da pruža povezanost između fizičkog i digitalnog svijeta u realnom vremenu. Podaci u realnom vremenu o nekom entitetu prikupljeni su uz pomoć senzora. Ti senzori spojeni su s „cloud“ bazom podataka koja zaprima te podatke te odmah vrši analizu. Tehnologija omogućuje strojno učenje, a razne manipulacije s entitetom testiraju se na virtualnom modelu koje potom mogu biti primijenjene na stvarni svijet. Na temelju praćenja životnog ciklusa nekog entiteta uz pomoć ove tehnologije, moguće je produžiti njegov životni vijek. Digitalni dvojnik integrira podatke iz mnogo različitih izvora te ih spaja u jednu platformu. Ta zajednička platforma omogućuje suradnju stručnjaka iz različitih područja kako bi spriječili skupe pogreške u nekom procesu. Takva suradnja čini neko poslovanje sigurnijim, profitabilnijim te održivim (Fuller i dr.).

Digitalni dvojnik baziran je na masivnim te kumulativnim podacima fizičkog svijeta u stvarnom vremenu, dobivenim mjerenjima u različitim dimenzijama. Takva mjerenja kreiraju stalno-ažurirani digitalni model koji pruža uvid u funkcioniranje nekog sustava. To nam omogućuje da poduzmemo određene preinake nad fizičkim modelom, primjerice promjenu na dizajnu nekog entiteta ili cjelokupnog proizvodnog sustava. Modeli koje nam digitalni dvojnici serviraju omogućuju nam realistična i cjelovita mjerenja nepredvidivosti. Ta mjerenja su analizirana zahvaljujući jeftinim i snažnim mogućnostima analize podataka te uz pomoć današnjih masivnih arhitektura za procesiranje i naprednih algoritama.

## 2.3 IZAZOVI USPOSTAVE DIGITALNIH DVOJNIKA

Glavni izazovi s kojima se digitalni dvojnici susreću su:

- IT infrastruktura,
- potrebna kvaliteta podataka,
- sigurnost i privatnost,
- povjerenje,
- standardizacija modela.

IT infrastruktura izuzetno je važna za digitalne dvojnike, kao što je i za IoT te naprednu analizu podataka. Digitalni dvojnici zahtijevaju infrastrukturu koja omogućava nesmetan rad IoT sustava i zahtjevno procesiranje prikupljenih podataka. Takva infrastruktura olakšava efektivan rad dvojnika. Bez učinkovite i dobro osmišljene infrastrukture, digitalni dvojnici neće biti u mogućnosti pružiti željene rezultate.

Sljedeći izazov temelji se na kvaliteti podataka potrebnih za pravilno funkcioniranje dvojnika. Podaci trebaju biti kvalitetni, bez šuma te kontinuiranog protoka. Ako podaci nisu kvalitetni i konzistentni, postoji rizik da dvojnik funkcionira ispod željene razine. Kvaliteta i broj IoT signala nužan su faktor za funkcioniranje ovog sustava. Praćenjem životnog ciklusa nekog entiteta stječemo uvid u to da li su prikupljeni podaci ispravni te korisni za funkcioniranje digitalnog dvojnika.

Unutar industrijskog okruženja, jasno je da su sigurnost i privatnost jedan od glavnih izazova. Prvenstveno zbog ogromne količine podataka, a zatim i zbog rizika kojeg ti podaci predstavljaju osjetljivim sustavima za obradu. Kako bi se ovaj izazov nadišao, ključno je da su tehnologije, koje omogućuju funkcioniranje digitalnih dvojnika, u kontinuiranom skladu s regulacijama o sigurnosti i privatnosti.

Izazovi s aspekta povjerenja dolaze od organizacijske strane te od strane korisnika. Tehnologija digitalnih dvojnika treba biti razglabana i objašnjena do temeljne razine kako bi se osigurala dovoljno dobra edukacija krajnjih korisnika o mogućnostima ove tehnologije. Uvjeravanje krajnjih korisnika da dvojnici pružaju rezultate sukladno očekivanjima, uz osiguranu privatnost i sigurnost, ključna je za stjecanje povjerenja.

Sljedeći izazov koji se proteže kroz sve stadije razvoja digitalnih dvojnika jest problem modeliranja takvih sustava zato što ne postoji nikakav standardizirani pristup tom modeliranju. Počevši od kreiranja dizajna pa sve do konačne primjene simulacije, postojanje takvog standardiziranog modela omogućuje bolje razumijevanje materije, tijekom neprestanog toka informacija u svakoj fazi razvoja i implementacije digitalnog dvojnika, od strane stručnjaka i korisnika. Također, potrebno je osigurati da su informacije iz svake domene, kao što su IoT i analiza podataka, transferirane do svake faze modeliranja digitalnog dvojnika. Na taj način postizemo kompatibilnost dvojnika s domenama, što nam u konačnici omogućava uspješno korištenje digitalnog dvojnika u budućnosti.

Unatoč ubrzanom razvoju kojeg ova tehnologija doživljava, potrebno je naglasiti sve ove izazove kako bi se omogućilo bolje razumijevanje ove tehnologije te kako bi se shvatilo što se od nje može očekivati. Potrebna je čvrsta IoT infrastruktura te bolje razumijevanje podataka potrebnih za izvođenje analiza. Pozitivne i negativne strane u očekivanjima od digitalnog dvojnika trebaju biti diskutirane, kako bi se osigurale odgovarajuće radnje tijekom razvoja ovoga sustava.

## 2.4 USPOREDBA DIGITALNIH DVOJNIKA, BIM-A I 3D CAD MODELA

U virtualnom svijetu postoje različiti oblici interpretiranja stvarnosti. Neki od njih, uz digitalne dvojnike, su primjerice BIM („Building Information Modelling“) te 3D model. Svi navedeni pojmovi su dosta slični, stoga je potrebno definirati njihove sličnosti i razlike.

Digitalni dvojnici i BIM slični su softveri. Temeljna razlika je u tome što je BIM fokusiran na dizajniranje i izgradnju objekta, a modeli digitalnih dvojnika omogućuju korisnicima interakciju s izgrađenom okolinom. Digitalni dvojnici postali su prva opcija pri kreiranju robusnih modela podataka objekata ili gradova u raznim dijelovima njihova životnog ciklusa. No, postavlja se pitanje, u čemu je razlika između njih i softvera BIM?

Unutar industrije došlo je do zabune kako razlikovati ove dvije važne tehnologije. Ključna razlika leži u načinu na koji se tehnologija koristi. Digitalni dvojnici nalaze najbolju primjenu u održavanju objekta, a BIM se koristi u fazama projektiranja i izgradnje.

Digitalni dvojnici te BIM modeli mogu se usporediti kroz sljedeće aspekte: porijeklo koncepta, područje primjene, pripadajuća tehnologija, softver te faze uporabe tijekom životnog ciklusa nekog objekta. BIM se uglavnom koristi kako bi se spriječile pogreške tijekom dizajniranja objekta, olakšala komunikacija između dionika, poboljšava učinkovitost izgradnje te prati vrijeme i troškovnik izgradnje. S druge strane, digitalni dvojnik objekta može se koristiti za predvidivo održavanje, poboljšanje učinkovitosti resursa, poboljšanje udobnosti za korisnike, "što-ako" analizu u svrhu poboljšanja dizajna objekta te u svrhu stjecanja vrijednih znanja koja će se upotrijebiti u budućim projektima (Khajavi i dr.).

Korisnici BIM-a su arhitekti, inženjeri te građevinari koji ga koriste tijekom dizajniranja i izgradnje. BIM također koriste upravitelji objekta za planiranje održavanja tijekom životnog ciklusa objekta. Također, moguće je navedenu tehnologiju koristiti i prilikom rušenja objekta pošto sadrži vrijedne informacije. Digitalni dvojnici koriste se od strane upravitelja objekta u fazi čitavog životnog ciklusa objekta kako bi se poboljšala njegova operabilnost. Podatke ove tehnologije mogu koristiti arhitekti, koji vrijedne podatke mogu primijeniti na dizajniranje budućih građevina.

Tehnologije koje podržavaju BIM u njegovoj postojećoj formi su: detaljno „3D CAD“ modeliranje, „Common data environment“ (CDE) za kreiranje jedinstvenog izvora informacija korištenog od različitih projektnih timova te standardizirani podatkovni formati koji omogućuju fluktuaciju BIM podataka između različitih softvera. Digitalni dvojnik temelji se na idućim tehnologijama: „3D CAD“ modeliranje, „Wireless sensor network“ (WSN), algoritmi za strojno učenje te analiza podataka. Glavni softveri koji se koriste za BIM su: „Autodesk Revit“, „ArchiCAD by Graphisoft“, „MicroStation by Bentley Systems“ te „Open source BIMserver by TNO“. Što se digitalnih dvojnika tiče, neki od softvera za njihovu izradu su: „Predix from General Electric“, „Dasher 360“ od „Autodeska“, „Ecodomus“ te „Bentley-ev“ softver pomoću kojeg je izrađen praktični dio ovog rada.

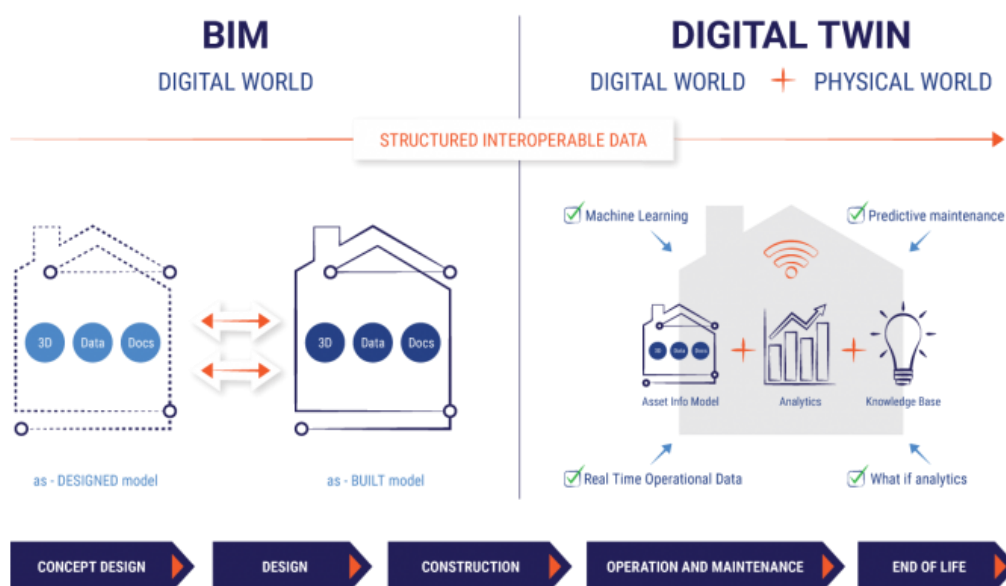
Ove dvije tehnologije razlikuju se po svojoj povijesti. BIM je osmišljen od strane Charlesa Eastmana sredinom 1970-ih te je prvi put primijenjen unutar „RUCAPS CAD“ sustava prilikom dizajniranja i izgradnje objekta „London Heathrow Terminal 3“. Prvi koncept digitalnog dvojnika korišten je od strane američke NASA-e na način koji je opisan u poglavlju 2.1. No, prva moderna primjena dogodila se nedavno, kada je firma „General Electric“ razvila „Predix“

softver za prikupljanje i obradu podataka prikupljenih senzorima, postavljenim na mlaznom motoru „GE90" u svrhu promatranja njegovog rada i održavanja.

Differentiator Concept	Application focus	Users	Supporting technology	Software	Stage of life cycle	Concept origin
BIM	Design visualization and consistency, Clash detection, Lean construction, Time and cost estimation, Stakeholders' interoperability [10]	AEC, Facility manager [16], [30]	Detailed 3D model, Common data environment (CDE), Industry Foundation Class (IFC), Construction Operations Building Information Exchange (COBie) [16]	Revit, MicroStation, ArchiCAD, Open source BIMserver, Grevit [16]	Design, Construction, Use (maintenance), Demolition [31]	Charles Eastman [16]
Digital Twin of Building	Predictive maintenance [26], Tenant comfort enhancement, Resource consumption efficiency, What-if analysis, Closed-loop design [23]	Architect, Facility manager	3D model, WSN, Data analytics, Machine learning [32]	Predix, Dasher 360, Ecodomus	Use (operation) [33]	NASA's Apollo program [22]

Slika 2.3 Usporedba digitalnog dvojnika i BIM-a (Khajavi i dr., 2019)

BIM je podešen za suradnju i vizualizaciju u fazama projektiranja i izgradnje, a ne za operacije vezane uz održavanje. Cilj BIM-a nije stvoriti "živi" model neke operativne zgrade. S druge strane, digitalni dvojnici prepoznati su kao najvažniji dio tehnološkog paketa nekog objekta. Daju nam sveobuhvatnu sliku izgrađenog okoliša u stvarnom vremenu. Mogu nam dati uvid u trenutno stanje građevnih podsustava, primjerice kakav utjecaj ima ponašanje stanovnika na različite sustave (grijanje, ventilacija...). Ovakav model evoluirao s vremenom kako bi uvijek dostavio podatke stanja u stvarnom vremenu. BIM je ulazni podatak za digitalnog dvojnika, ali ne može sam odgovoriti na pitanja o operativnoj učinkovitosti te stanju objekta.



Slika 2.4 Razlike između digitalnog dvojnika i BIM-a (URL 2)

Iako 3D modeli i digitalni dvojnici koriste tehnologiju baziranu na virtualnim simulacijama, te dvije tehnologije bitno se razlikuju. Unatoč tome što je 3D model idealan za primjenu u fazi dizajniranja, on nudi daleko manje mogućnosti ispitivanja nego digitalni dvojnici.

Najveća razlika između ovih dvaju modela, leži u tome što digitalni dvojnici kreiraju virtualnu okolinu pogodnu za provođenje niza simulacija, podržanih podacima u stvarnom vremenu te protokom informacija između virtualnog modela i senzora koji prikupljaju podatke. Na temelju toga povećava se preciznost prediktivne analize modela te se na temelju kontinuiranog praćenja nekog entiteta omogućava stjecanje kvalitetnijeg znanja za upravljanje nad njim.

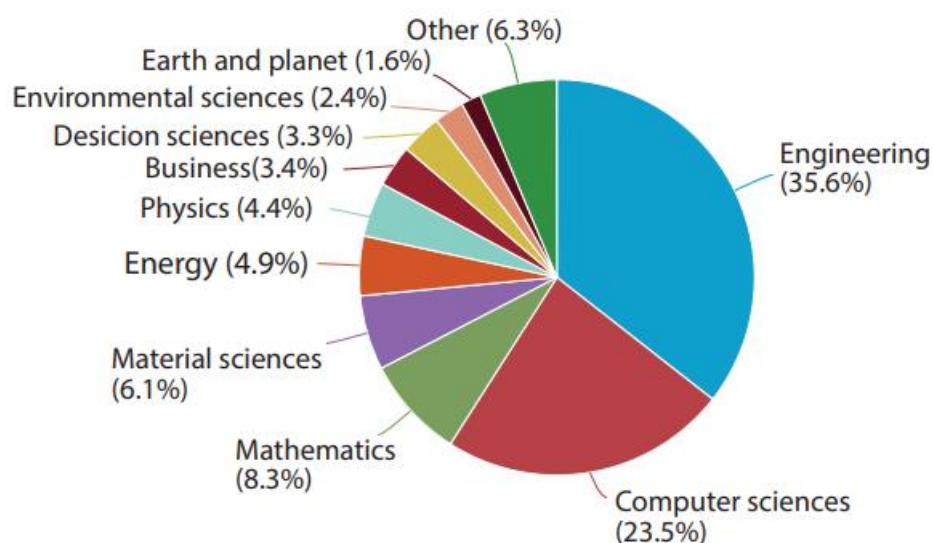
Nadalje, razlika između ovih modela objašnjena je kroz 3 točke:

- statično/aktivno – 3D CAD modeli modeliraju objekt ili proces tako da se definiraju različiti parametri ili elementi dizajniranja. Takav model je statičan te se neće promijeniti ukoliko dizajner ne uvede nove elemente. Digitalni dvojnici, za razliku od CAD modela, imaju dimenziju vremena. Protokom informacija u stvarnom vremenu između fizičkog i virtualnog svijeta, digitalni dvojnik se stalno mijenja te evoluira, pružajući pri tome aktivnu simulaciju. Dvojnik stalno sazrijeva tijekom životnog ciklusa nekog objekta, obogaćujući se novim podacima te analizama nad njima. Tako nešto nije moguće postići uz statičnu simulaciju,
- moguće/aktualno - promatrajući 3D model, može se vidjeti što bi se moglo dogoditi s objektom, a digitalni dvojnik pruža informacije o tome što se događa u stvarnom vremenu u fizičkom svijetu. Kao što je već navedeno, bilo kakve promjene na statičnoj simulaciji limitirane su time što te promjene mora unijeti sam stručnjak. S druge strane, koristeći digitalni dvojnik kao ogledalo objekta u stvarnom vremenu, stručnjak može uvidjeti da li taj proizvod funkcionira u skladu s očekivanjima te koja unaprjeđenja bi se mogla izvršiti. Takve odluke odražavaju se sve do faze dizajniranja, što omogućava da se neki novi objekti ili proizvodi stalno poboljšavaju te prilagođavaju tržištu. Nad statičnim modelom mogu se provoditi samo teoretske simulacije, dok je digitalni dvojnik aktualan te pruža daleko veće mogućnosti,
- područje korištenja – obični 3D modeli omogućavaju stručnjacima testiranje različitih scenarija primjenom različitih parametara, što je korisno u fazi dizajniranja. Područje primjene digitalnih dvojnika znatno je šire. Ono uključuje sve faze u životnom ciklusu entiteta. Digitalni dvojnici ne koriste isključivo u fazi dizajniranja, omogućavajući unaprjeđenje procesa te donošenje boljih poslovnih odluka.

Dok obični 3D modeli mogu pokazati mogućnosti razvoja događaja u stvarnom svijetu, digitalni dvojnici pored toga nude mogućnost procjeniti što se trenutno događa s nekim entitetom te se na temelju toga mogu izgraditi mnogo bolje predikcije općeg stanja istog. Takav pregled prezentiran je u 3D formatu, čineći ga jednostavnim za promatranje i analiziranje. Neki od benefita promatranja nekog entiteta tijekom čitavog životnog ciklusa očituju se u sprječavanju donošenja loših poslovnih odluka, smanjenju troškova održavanja te u uočavanju novonastalih deformacija na vrijeme. Ovakva digitalna transformacija omogućava napredak u fazi dizajniranja na temelju stečenih spoznaja do tada promatranih dvojnika te stvaranje novih ideja (URL3).

### 3. PREGLED UPORABE DIGITALNIH DVOJNIKA U SVIJETU

Digitalni dvojnik zavukli su se u mnoge grane industrije. Očekuje se da će tržište digitalnih dvojnika, koje je 2020-e godine vrijedilo 3,1 milijardu američkih dolara, dostići vrijednost u iznosu od 48,2 milijarde dolara do 2026-e godine (URL 4). Povećana potražnja za digitalnim dvojnicima u sektoru zdravstva uslijed COVID-19 pandemije te traženje rješenja u primjeni digitalnih dvojnika kako bi se brojni sektori suočili s posljedicama pandemije, ključni su faktori koji su doveli do eksplozije tržišta. U ovom poglavlju navedeni su neki zanimljivi primjeri korištenja tehnologije digitalnih dvojnika u raznim poljima industrije. Gledajući iz aspekta objavljivanja znanstvenih članaka na temu digitalnih dvojnika, u periodu od 2014-e do 2019-te, najviše radova je fokusirano u domeni inženjerstva (proizvodnja, robotika, razvoj proizvoda) te računalnih znanosti (simulacije, analize i ostalo).



Slika 3.1 Područja objava znanstvenih članaka na temu digitalnih dvojnika (Campos-Ferreira i dr., 2019)

#### 3.1 DIGITALNI DVOJNIK ZEMLJE

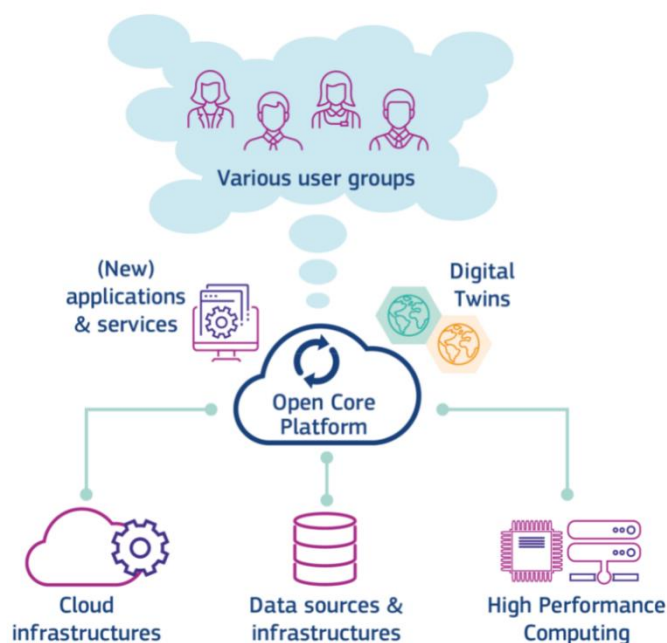
Europska Unija je u procesu finaliziranja planova za izradu digitalnog dvojnika planete Zemlje. Kao dio „Green Deal” i „Digital Strategy” strategija od strane Europske Komisije, program „Destination Earth” („DestinE”) pridonijet će digitalnoj tranziciji. Dvojnik bi simulirao atmosferu, ocean, ledenjake te kopneni dio s nevjerojatnom preciznošću, pružajući pri tom mogućnost predviđanja poplava, suša te požara danima, a za neke pojave čak i godinama unaprijed. Nadalje, pokušat će se pratiti ljudsko ponašanje, pružajući svjetskim liderima mogućnost da uvide kako vremenske prilike te klimatske promjene utječu na čovječanstvo. Pomoću „Destination Earth” bit će moguće izmjeriti učinak novo-uvadenih klimatskih mjera. Dijeleći Zemljinu atmosferu na manja područja široka svega 1 kilometar, što je znatno manje područje nego što ga koriste današnji klimatski modeli, „Destination Earth” bazira svoje prognoze na finim podacima u stvarnom vremenu, koji nisu bili dostupni na tako detaljnoj razini nikada do sada (URL 5).

„DestinE“ prikazuje potencijal digitalnog modeliranja Zemljinog sistema. Program je fokusiran na efekte klimatskih promjena, vodena i morska područja, polarna područja, kriosferu, bioraznolikost te na ekstremne vremenske prilike.

Cilj Europske Unije također je dati javni pristup toj platformi stanovnicima širom Europe. Korisnici ove platforme bit će u mogućnosti pristupiti ogromnoj količini socijalno-ekonomskih te bioloških podataka kako bi:

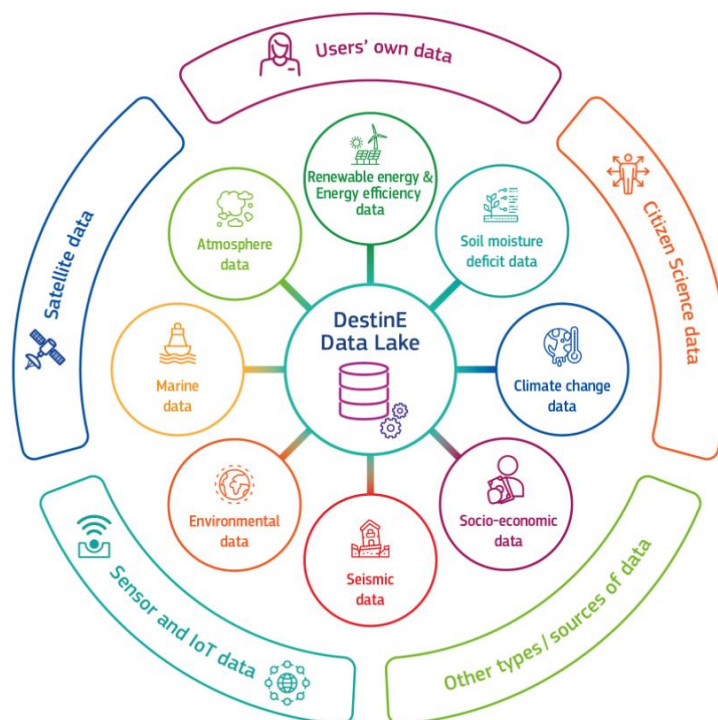
- neprestano pratili zdravlje planete Zemlje. Tu se radi o proučavanju efekata klimatskih promjena, stanja oceana, kriosfere, bioraznolikosti, prirodnih resursa te načina korištenja zemljišta,
- bili podrška kreiranju i provedbi politike EU. Primjerice, pomoć u procjeni utjecaja i učinkovitosti politike zaštite okoliša te pripadajućih zakonodavnih mjera,
- provodili visoko precizne, dinamične simulacije Zemljinog prirodnog sustava,
- poboljšali kapacitete modeliranja i predviđanja. Primjerice, predviđanje poplava, oluja i drugih ekstremnih vremenskih uvjeta,
- doprinijeli razvoju industrijskih i tehnoloških kapaciteta Europe u simuliranju, modeliranju, prediktivnoj analizi podataka, umjetnoj inteligenciji te u zahtjevnom računanju.

U srcu „DestinE“ platforme bit će „cloud-based“ korisnička i sigurnosna platforma za digitalno modeliranje i simulaciju. Platforma će omogućiti pristup podacima te svojoj infrastrukturi potrebnoj za procesiranje i analizu.



Slika 3.2 Struktura „Destination Earth“ platforme (URL6)

Kako bi učinkovito upravljao velikim skupom podataka, „DestinE“ će koristiti takozvani „Data Lake“. Radi se o infrastrukturi podataka podijeljenoj po vrsti te načinu prikupljanja podataka.



Slika 3.3 Struktura „DestinE Data Lake“ platforme (URL6)

„DestinE“ će se razvijati postepeno kroz sljedeće prekretnice:

- do 2024. - razvoj digitalne platforme otvorene jezgre te prva dva digitalna dvojnika namijenjenim ekstremnim vremenskim događajima i analizi klimatskih promjena,
- do 2027. - integracija dodatnih digitalnih dvojnika, primjerice digitalni dvojnik oceana, koji će služiti specifičnim sektorima,
- do 2030. - uspostava cjelovitog digitalnog dvojnika planete Zemlje.

Digitalni dvojnik za ekstremne vremenske prilike kombinirat će podatke sa simulacijama koje će posjedovati do sada ne viđene mogućnosti. Stručnjaci će biti u mogućnosti s velikom preciznošću predvidjeti pojavu te utjecaj tih ekstremnih događaja. Informacije dobivene analizom pomoći će procijeniti funkcionalnost strategija upravljanja rizikom. Konkretni primjer bio bi postupanje uslijed poplave ili suše na osjetljivim riječnim područjima. Vlasti će biti u mogućnosti testirati učinkovitost mogućih mjera ublažavanja:

- u civilnoj zaštiti: razvoj lokalnih planova upravljanja u hitnim slučajevima,
- u poljoprivredi: ponovna uporaba otpadnih voda i usjeva otpornih na sušu,
- u energetici i prometu: priprema za pojave problema u hidroelektranama.

Digitalni dvojnik za promatranje utjecaja klimatskih promjena koristit će se za predviđanje takvih promjena s do sada neviđenom pouzdanošću na regionalnoj i nacionalnoj razini. Pružit će podršku Europskoj Uniji u razvoju pouzdanih strategija za ublažavanje učinaka tih promjena. Nadalje, „DestinE“ će podržavati pametnu poljoprivredu. Pomoću analize podataka te prateći relevantne trendove (kao na primjer predviđene sezone padalina ili suše), pomoći će u usvajanju isplativih i održivih poljoprivrednih strategija.

Digitalni dvojnici gradova zaokružat će sve digitalne dvojnike u jednu cjelinu. Digitalizirajući građevine, ulice, parkove te okoliš, gradska uprava unaprijedit će urbano planiranje te

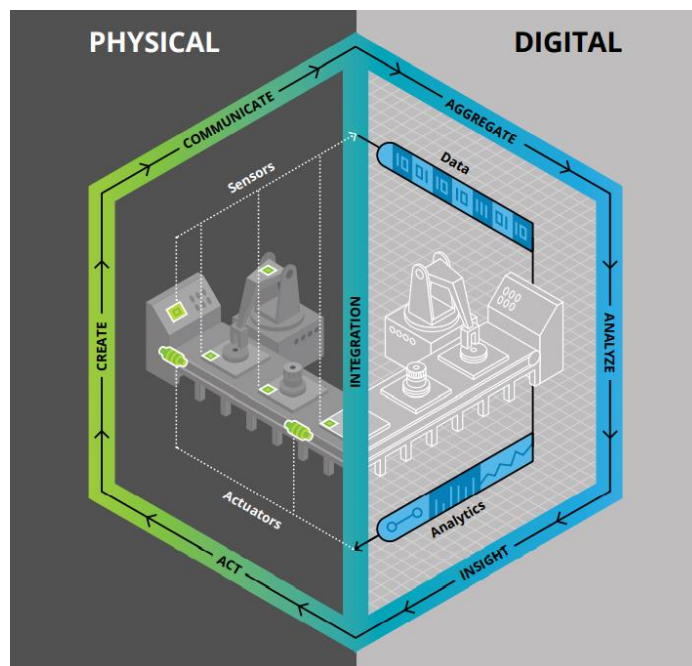
upravljanje infrastrukturom, upravljanje gradskim prometom, prikupljanje otpada te će biti u mogućnosti smanjiti količinu utrošene energije.

### **3.2 PRIMJENA DIGITALNIH DVOJNIKA U RAZLIČITIM SEKTORIMA**

Digitalni dvojnici nalaze primjenu u brojnim sektorima. Objekti kao što su primjerice motori letjelica, vlakovi, platforme, turbine i drugi mogu biti dizajnirani i testirani prije nego što se fizički proizvedu. Također, zahvaljujući ovoj tehnologiji, njihovo održavanje bi bilo podignuto na znatno višu razinu. Primjerice, tehničari bi mogli koristiti digitalnog dvojnika nekog entiteta za testiranje predloženog popravka neke komponente upravo nad njim, prije nego što se to primjeni na fizičkom entitetu. Također, mogućnosti primjene u geoprostornoj industriji su široke. U ovom poglavlju istaknut ćemo neke najinteresantnije primjere korištenja digitalnih dvojnika.

#### **3.2.1 Primjena digitalnih dvojnika u proizvodnom lancu**

Digitalni dvojnici nalaze primjenu unutar proizvodnog sustava. Razlog je taj što proizvođači uvijek traže način pomoću kojeg njihovi proizvodi mogu biti praćeni i nadzirani s ciljem optimizacije, odnosno uštede vremena i novca. To dvoje u središtu je interesa svakog proizvođača. Podaci govore da upravo digitalni dvojnici imaju najznačajniji utjecaj u ovome području. Na krilima četvrte industrijske revolucije, povezanost uređaja pretvara koncept digitalnih dvojnika u procesu proizvodnje u stvarnost. Ova tehnologija ima potencijal davanja uvida u performanse strojeva u stvarnom vremenu, kao i uvida u stanje cjelokupnog proizvodnog procesa. Primjena digitalnih dvojnika povećava povezanost uređaja te kvalitetu povratnih podataka, unaprjeđujući pouzdanost i samo izvedbu. Algoritmi umjetne inteligencije povezani s digitalnim dvojnicima imaju potencijal ostvarivanja velikih postignuća, uz današnju mogućnost pohrane velike količine podataka, potrebnih za istraživanja i prediktivnu analizu. Digitalni dvojnici kreiraju okolinu za testiranje proizvoda te za praćenje izvedbe cjelokupnog sustava opskrbljenim podacima u stvarnom vremenu, što za lance proizvodnje predstavlja ogromni potencijal.



Slika 3.4 Digitalni dvojnici lanca proizvodnje (Parrott i dr., 2017)

Na slici 3.4 nalazi se primjer jednog lanca za proizvodnju prikazanog kroz fizički i digitalni svijet. Digitalni dvojnici prikazuju virtualnu repliku onoga što se događa u tvornici u gotovo stvarnom vremenu. Tisuće senzora raspoređeno je unutar cijelog lanca proizvodnje te kontinuirano primaju podatke raznih dimenzija: od karakteristika performansi strojeva u pogonu (brzina, debljina, kvaliteta boje, okretni moment i drugo) pa sve do uvjeta koji vladaju u tvornici. Ti podaci prikupljeni sensorima kontinuirano se prenose u digitalni svijet pomoću tehnologije integracije. Digitalni dvojnici pri tome konstantno analiziraju pristigle podatke. Nakon određenog vremena, analize mogu otkriti neprihvatljive trendove u izvedbi proizvodnog procesa, uspoređujući stvarno stanje s idealnim rasponom određenih performansi. Takav komparativan uvid može potaknuti istragu, a ona može rezultirati potencijalnim promjenama nekih aspekata u stvarnom svijetu proizvodnog procesa. Interakcija između fizičkog i digitalnog svijeta naglašava dubok potencijal digitalnih dvojnika. Tisuće senzora kontinuirano prikuplja mjerenja koja se prenose na digitalnu platformu, koja potom obavlja analizu u gotovo stvarnom vremenu kako bi se optimizirao poslovni proces. Ukoliko je potrebno djelovati u stvarnom svijetu, digitalni dvojnici djeluju putem probuđivača, koji su podložni ljudskoj intervenciji. Naravno, sustav ove tehnologije daleko je kompleksniji nego što ova slika može dočarati. Konfiguracija digitalnog dvojnika prikazanog na slici predstavlja putovanje iz fizičkog svijeta u digitalni pa opet natrag u fizički. Ovakva petlja predstavlja kamen temeljac četvrte industrijske revolucije. Kao što je već opisano, takva revolucija opisuje digitalno okruženje koje kombinira napredne proizvodne tehnike s IoT-om pri čemu dolazi do proizvodne sinergije, gdje se informacije komuniciraju, analiziraju te koriste za pokretanje daljnjeg inteligentnog djelovanja u fizičkom svijetu.

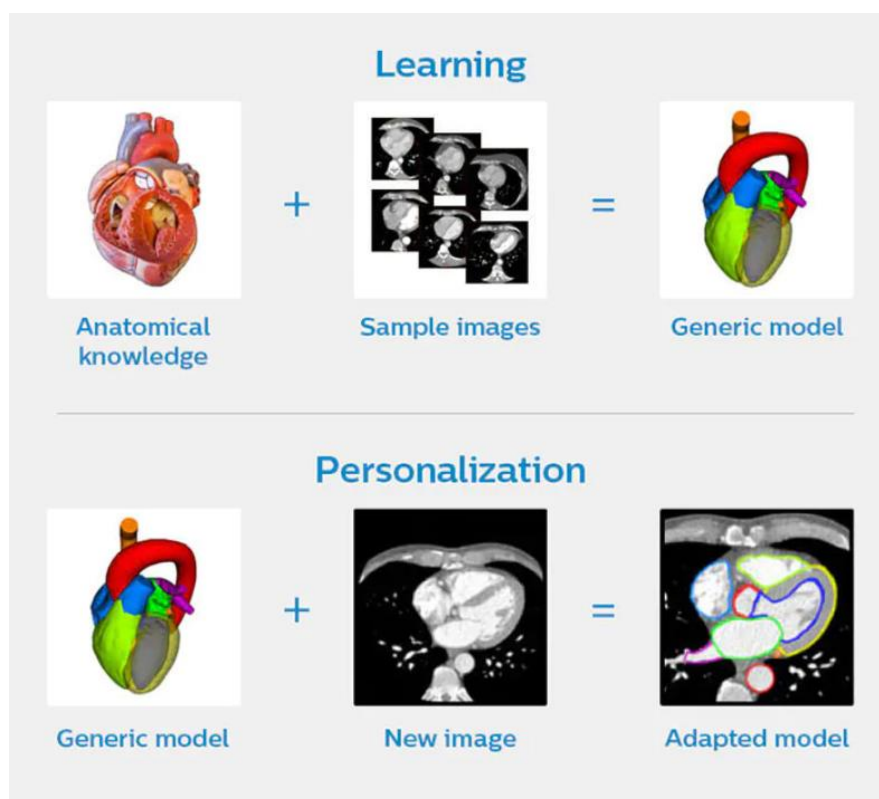
Nadalje, vrlo značajnu primjenu digitalnih dvojnika nalazimo u automobilske industriji. Najbolji primjer primjene ove tehnologije je kompanija Tesla. Mogućnost stvaranja digitalnog dvojnika motora ili nekog drugog dijela auta, omogućava provođenje simulacija nad njima te analizu podataka. Umjetna inteligencija poboljšava točnost testiranja. Pomoću nje, stručnjaci su u stanju provoditi analize podataka vozila dobivenih iz stvarnog svijeta, što im omogućava

uvid u trenutno stanje komponenti te predviđanje kako će pojedine reagirati u budućnosti. Uporaba dvojnika u ovoj industriji postajat će sve važnija i važnija kako više autonomnih vozila bude upućeno na cestu. Primjenu također nalazimo u zrakoplovnom i obrambenom sektoru. „LOCOMACHS" je implementirao tehnologiju digitalnih dvojnika u cijelom montažnom procesu za krilo zrakoplova kako bi pratili njegove performanse.

### **3.2.2 Primjena digitalnih dvojnika u zdravstvenom sektoru**

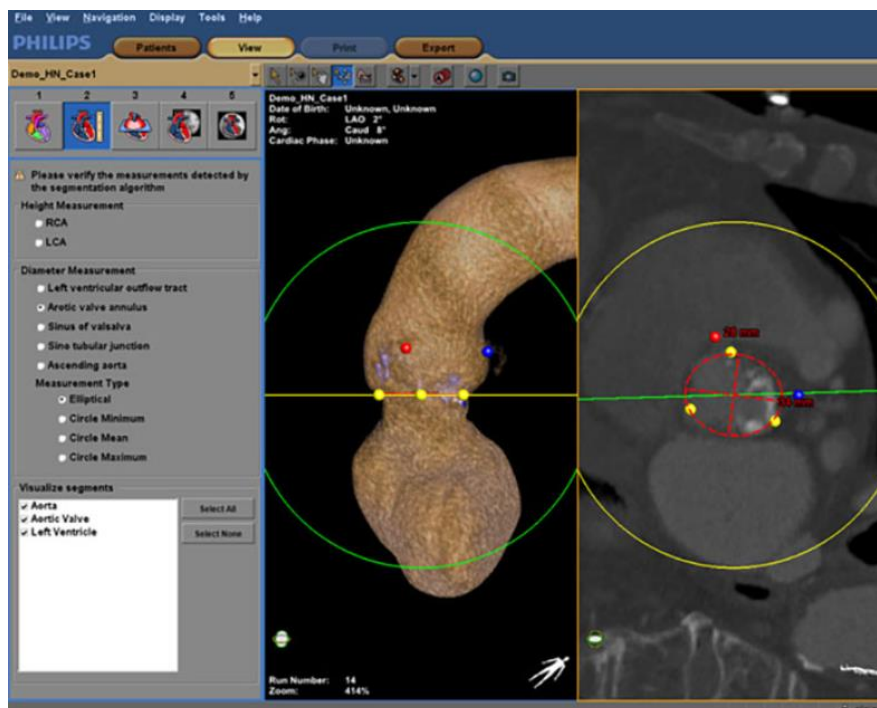
Rast i razvoj tehnologije na ovaj sektor ima nemjerljiv utjecaj jer ono što se smatralo da je ne moguće, sada postaje moguće. IoT uređaji su jeftiniji i jednostavniji za primjenu, kao što su i dobro povezani. Upravo taj napredak u povezanosti uređaja daje prostor tehnologiji digitalnih dvojnika za uporabu u ovom sektoru. Primjenom ove tehnologije omogućit će se stvaranje digitalnog dvojnika čovjeka, koji će davati analizu ljudskog tijela u stvarnom vremenu. Malo realističnija sadašnja primjena pak omogućava simulaciju djelovanja određenih lijekova. Također, moguće je koristiti digitalnog dvojnika pacijenta prilikom planiranja i provođenja operacija. Nadalje, istraživači, doktori te drugi pružatelji zdravstvenih usluga imaju mogućnost simulirati okolinu specifičnu za njihove potrebe u stvarnom vremenu ili u budućnosti. Kombiniranje ove tehnologije s algoritmima umjetne inteligencije, omogućit će donošenje pametnijih odluka i boljih predikcija. Mnoge sadašnje primjene unutar zdravstva ne uključuju direktno pacijenta, ali su izrazito korisni u razvijanju metoda za liječenje pacijenata. Tehnologija digitalnih dvojnika u zdravstvu zapravo je u povojima, ali ima ogromni potencijal od upravljanja jednim krevetom pa sve do čitavog sustava bolnice. Imati sposobnost simulacije i djelovanja u stvarnom vremenu u zdravstvu radi razliku između života i smrti. Digitalni dvojnici u medicinskom okruženju, zajedno s umjetnom inteligencijom te podacima u stvarnom vremenu i onih povijesnih, ima potencijal za donošenje odluka koje spašavaju živote. On također može biti od izuzetne koristi prilikom popravka i održavanja medicinske opreme.

Krajna vizija kompanije „Phillips" je stvaranje personaliziranog modela pacijenta, koji će ga pratiti tijekom čitavog života. Takva ideja još uvijek spada u malo udaljeniju budućnost, ali tehnologija digitalnih dvojnika već se primjenjuje nad pojedinim dijelovima tijela te izgleda obećavajuće. Phillips je izradio aplikaciju „HeartModel". Ona izrađuje personalizirani 3D model pacijentovog srca baziranog na 2D ultrazvučnim slikama. Kako „Phillips" kaže, jednog dana virtualno srce može spasiti ono pravo.



Slika 3.5 Način na koji „Heart Model” izrađuje personalizirani model srca (URL 7)

Na slici 3.5 nalazi se primjer korištenja digitalnog dvojnika u zdravstvu putem kreiranja personaliziranog modela srca. U osnovi modela nalazi se generalno znanje o strukturi srca. Takav model dobiven je na temelju učitavanja oko tisuću ultrazvučnih snimki srca različitih oblika i veličine. Nadalje, model je nadopunjen snimkama nekog pacijenta, što ga pretvara u personalizirani format. Snaga ovakvog pristupa leži u kombiniranju znanja o anatomiji te napredne analize podataka. Također, „Phillips” je razvio alat nazvan „Phillips HeartNavigator”. On kombinira „CT” slike snimljene prije operacijskog zahvata u jednu sliku pacijentove anatomije srca koja je preklapljena s rendgenskim podacima uživo tijekom operacije. Ovakav alat pojednostavljuje planiranje postupka, pomažući kirurgu pri odabiru uređaja te razradi plana. Tijekom operacije, pruža se 3D uvid u stvarnom vremenu. To je izuzetno važno prilikom operacija gdje milimetri igraju ključnu ulogu, kao na primjer pri zamjeni oštećenog zaliska u pacijentovom srcu. Virtualno tada postaje vodič za fizičko, poboljšavajući pri tome vještine kirurga. U budućnosti, platforme kao što su „HeartModel” (Slika 3.5) i „HeartNavigator” (Slika 3.6) uparit će se s „VR” („Virtual Reality”) tehnologijom što će omogućiti doktorima vježbanje provođenja kompleksnih zahvata. Također, tehnologija će naći primjenu u obrazovanju studenata, koji će tada moći vježbati nad virtualnim pacijentima. Sveučilište Stanford već koristi „VR” tehnologiju kao alat za edukaciju, vizualizirajući model rada srca u 3D formatu.



Slika 3.6 „HeartNavigator“ platforma (URL 7)

Ključ uspjeha platforme digitalnih dvojnika u ovom sektoru leži u okupljanju različitih stručnjaka te različitih domena znanja. U istome trenutku, odnosno na istome modelu, surađuju stručnjaci s polja fizike, biologije, medicinskih znanosti, kompjutorskih znanosti, obrade podataka i drugi. Najveći napredak stvara se na temelju interdisciplinarnе suradnje.

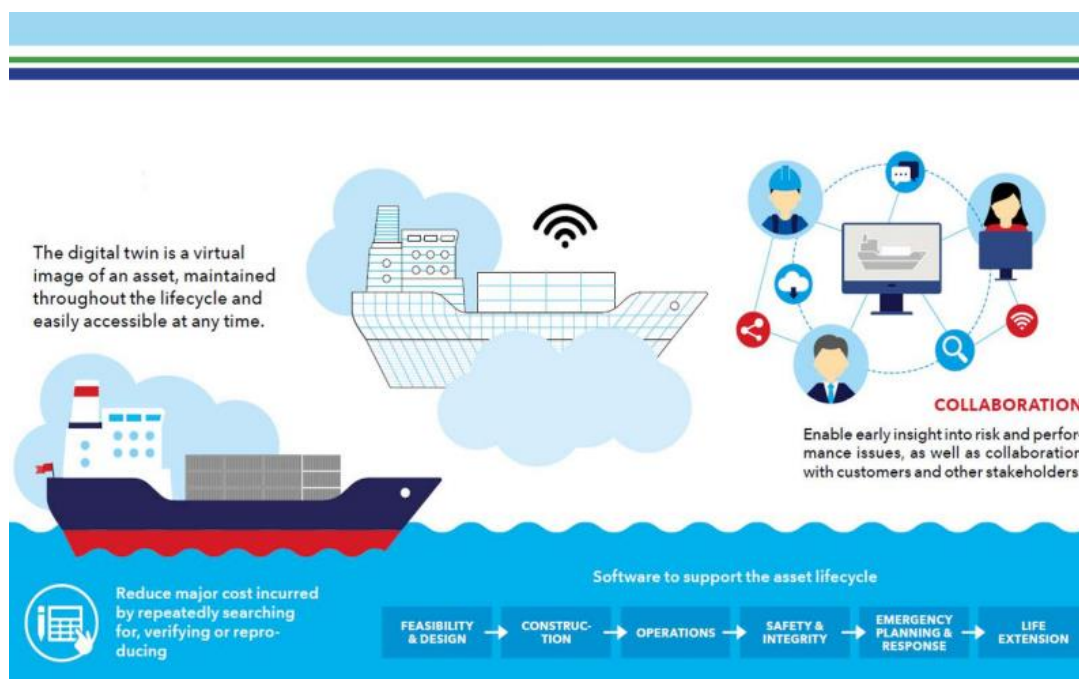
### 3.2.3 Primjena digitalnih dvojnika u energetsom sektoru

Tvrtka „General Electrics“ iskoristila je tehnologiju digitalnih dvojnika za izradu „Digital Wind Farm“ projekta, „cloud-based“ modela postrojenja vjetroelektrane. Generalni menadžer „General Electrics-a“ Keith Longtin izjavio je: " Svaka farma vjetrenjača ima jedinstven profil, kao DNA ili otisak prsta. Razmišljali smo o tome da skupimo podatke strojeva kako bi uvidjeli u kakvoj su interakciji s okolinom i vjetrom te na temelju toga izgradimo digitalnog dvojnika unutar kompjutera za svaku farmu. Njega bi iskoristili za dizajniranje najefikasnije turbine za svaku poziciju na farmi, optimizirajući cijeli sustav u korak s vremenom". U praksi, zahvaljujući tehnologiji digitalnih dvojnika, inženjeri mogu miješati i povezati različite konfiguracije turbine sukladno uvjetima koji vladaju na farmi. Onog trenutka kada je vjetro-turbina instalirana, digitalni dvojnικ analizira i skuplja podatke od fizičkog modela te predlaže rješenja kojima bi se cijeli sustav dodatno optimizirao. Primjer digitalne vjetroelektrane izrađen je na platformi „Predix“. „Predix“ kao rezultat daje digitalno prikazanu infrastrukturu vjetroelektrane, omogućujući prikupljanje, vizualizaciju te analizu podataka o energiji vjetra. Rezultati analize omogućuju maksimalno iskorištavanje performansi vjetra te mogućnost prediktivnog održavanja turbine. Prikupljajući podatke vremenskih prilika, informacija o komponentama, servisna izvješća te performanse sličnih dvojnika u koraku s vremenom, digitalni dvojnικ se konstantno optimizira te se podaci pretvaraju u djelotvorne alate.

### 3.2.4 Primjena digitalnih dvojnika u pomorskom sektoru

Brodarstvo trenutno prolazi kroz digitalnu transformaciju kako bi se optimizirao profit i provjerila usklađenost između regulatornih zahtjeva i zahtjeva kupaca. Digitalizacija u ovom sektoru ključna je za održavanje kontrole nad tokom prihoda te za minimiziranje ekoloških štetnih učinaka. Mnoge inicijative digitalizacije već su aktivne. Neki se oslanjaju na korištenje operativnih podataka, a neki na automatizaciju dokumentacije plovila i izvještavanja kako bi se povećala učinkovitost flote. Također, postoji veliki potencijal u fazi projektiranja, izgradnje te puštanja u pogon u smislu da se poboljša suradnja i integracija sustava u ranoj fazi korištenjem digitalnih alata. Koncept „The digital twin ship” uveden je u pomorsku industriju te pokriva navedene elemente. Razmišljanje o ovom konceptu može se promatrati kao stvaranje vrijednosti za sve dionike u brodarskoj industriji tijekom životnog ciklusa svakog broda u floti. Dugo je bio slučaj da operateri imovine nisu mogli u potpunosti iskoristiti dostupne digitalne informacije i alate. Trenutno se u ovom sektoru ne prakticiraju velika ulaganja ukoliko se ne očekuje trenutna otplata. Menadžment i organizacije trebaju prihvatiti izazov te postepeno pristupiti iskorištavanju ovih novih prilika.

Digitalni dvojnici brodova bit će izrađivani prije te za vrijeme izgradnje plovila. Kao što je prikazano na slici 3.7, softver modeli olakšat će testiranje integriranosti sustava prije i tijekom izgradnje. Tijekom njihovog rada, digitalni dvojnici imaju ulogu sustava za kontinuiranu integraciju te obradu i analizu podataka senzora. Podaci o izvedbi i simulacijski modeli mogu ukazati na moguće promjene dizajna ili načina rada, osiguravajući pri tom povećanu učinkovitost te produljenje životnog vijeka plovila. Digitalni dvojnik može biti i sustav informacijske platforme koji sadrži dokumentaciju upotrijebljenih materijala, rješavajući pri tom važna ekološki sigurnosna pitanja.



Slika 3.7 Digitalni dvojnik plovila kroz njegov životni ciklus (DNV GL, 2018)

Koncept digitalnog dvojnika poboljšat će upravljanje informacijama te suradnju stručnjaka, pri čemu oni mogu zajedno raditi, sprječavajući skupe pogreške. Digitalni dvojnici omogućit će:

- platformu na kojoj se nalaze svi relevantni podaci o brodu te analize i modele svakog broda u flotili, dostupne u bilo koje vrijeme,
- ažuriranje informacija u stvarnom vremenu tijekom čitavog životnog ciklusa broda,
- analitičke i simulacijske modele, ažurirane i dopunjene operativnim podacima i podacima senzora kako bi odražavali izvedbu plovila,
- prikupljanje i pohranu podataka specifičnih za vanjske uvjete, kao što su vrijeme, struje i valovi,
- kontrolirano dijeljenje podataka, modela i ažuriranih informacija o imovini između dionika,
- rani uvid u potencijalne probleme u fazi dizajniranja,
- poboljšanu kvalitetu i učinkovitost procesa odobravanja i certificiranja.

Razmjena informacija između različitih dobavljača i dionika oduvijek je bila ključna za pomorsku industriju. Kako moderni brodski sustavi postaju složeniji i integriraniji, optimalna izvedba ovisi o optimalnom radu svih podsustava, kako pojedinačno tako i agregirano. Vrlo je izazovno imati potpuni pregled svih sustava, ali i vrlo bitno kako bi dizajneri i različiti operatori bolje razumjeli kako sustavi međusobno djeluju te kako radnje operatora utječu na ukupnu izvedbu. Digitalni dvojnici mogu biti savršeni alati za izgradnju zajedničkog razumijevanja. Pri tome, nužno je stvaranje digitalnog ekosustava, odnosno platforme za upravljanje imovinom. Ekosustav mora biti mreža međusobno povezanih podataka, softverskih i hardware-skih modela koji se odnose na imovinu i njene sustave. Senzorski podaci, daljinski nadzor te napredna analitika koje pruža digitalni dvojnici omogućuje profitabilnije, sigurnije i održivije poslovanje.

Dobrobiti digitalnih dvojnika u ovom sektoru osjetit će se na svim razinama. Za vlasnike brodova, digitalni dvojnici pružit će alat za vizualizaciju broda i podsustava, analizu operativnih podataka, optimizaciju performansi broda, poboljšanu internu i eksternu komunikaciju te sigurno rukovanje povećanom razinom autonomije. Za proizvođače opreme, platforma digitalnih dvojnika pružit će olakšanu integraciju sustava, demonstraciju performansi tehnologije, kontrolu kvalitete sustava te mogućnost promocije dodatnih usluga za praćenje i održavanje. Vladajućim strukturama dvojnik će ponuditi sustavni okvir koji može biti povezan s aplikacijama za automatski unos informacija i generiranje potrebnih izvješća sa svakog plovila. To može osigurati kvalitetno izvještavanje, pri čemu je opterećenje za posadu manje, a također se postiže veća transparentnost u cijelom lancu vrijednosti. Digitalni dvojnici zahtijevat će i specijalizirane konzultantske usluge. Njihova uloga bit će učinkovito generiranje koncepta s obzirom na najsuvremenije zahtjeve i standarde za razmjenu modela i rukovanje velikim količinama podataka.

Osposobljavanje budućeg i postojećeg pomorskog osoblja ključno je za prihvaćanje digitalnih rješenja u ovoj industriji. Pomorske akademije mogu istražiti koncept digitalnih dvojnika, nudeći obuku za taj virtualni sustav koji pruža potporu pri donošenju odluka. Akademije se mogu povezati s plovilima u radu te budući zaposlenici mogu istraživati podatke koji se prenose uživo. U mogućnosti su vizualizirati povijesne podatke te simulirati scenarije za testiranje rezultata operativnih promjena. Takav način obuke povećava razumijevanje cijelog plovila te osposobljava osoblje za razmišljanje o sustavima kako bi vidjeli integrirane posljedice neke radnje. Sveučilišta i istraživački instituti također mogu na ovoj platformi graditi svoje istraživanje i obrazovanje.

### 3.2.5 Primjena digitalnih dvojnika u geoprostornoj industriji

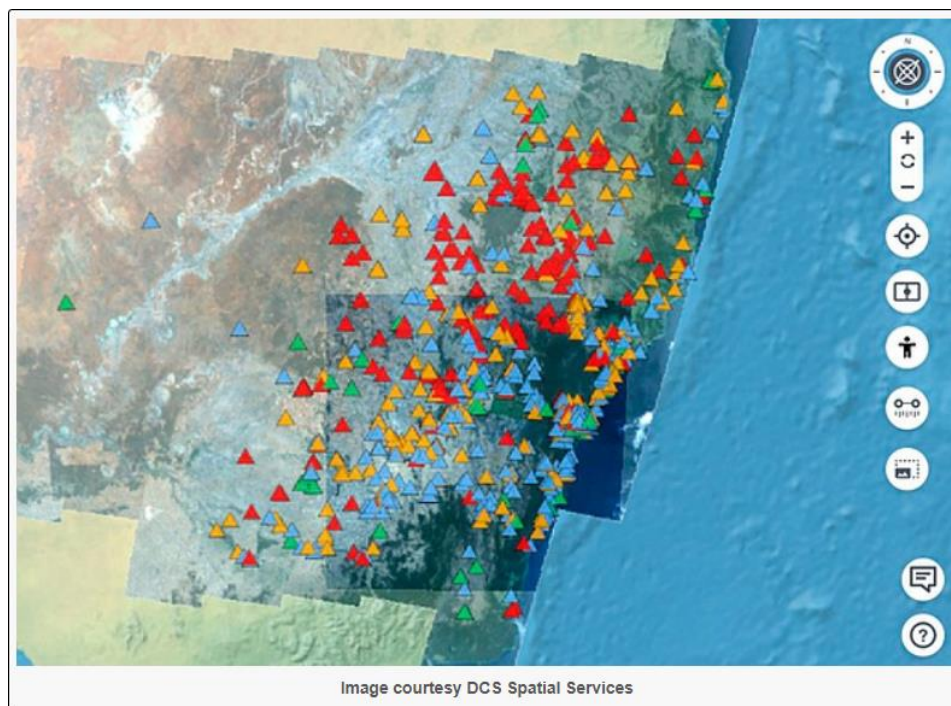
Upotreba i potencijal digitalnih dvojnika na području pametnih gradova povećava se iz godine u godinu, zahvaljujući brzom razvoju u povezanosti preko „IoT“ uređaja. Broj pametnih gradova sve je veći. Što su zajednice povezanije, više se koriste digitalni dvojnici. Mogućnost da se jedan pametan grad opremljen senzorima, zahvaljujući različitim servisima i infrastrukturi, prati pomoću „IoT“ uređaja je od velike vrijednosti za sve vrste sigurnosti u budućnosti. Može pomoći pri planiranju i razvoju postojećih pametnih gradova te onih koji su u razvoju. Nadalje, postoji potencijal u vidu uštede potrošnje energije, što bi imalo pozitivne ekološke učinke. Takva vrsta podataka dala bi odličan uvid u način na koji se komunalne usluge distribuiraju i koriste. Implementacija digitalnih dvojnika u pametne gradove definitivno bi značila napredak. Postojanje dvojnika omogućio bi testiranje različitih scenarija prije samog djelovanja. Pri tome dvojnici bi stalno učio iz okoline te analizirao promjene uz pomoć prikupljenih podataka. Već postoji digitalni dvojnici Singapura te se očekuje da i ostali gradovi počnu slijediti taj trend. U Singapuru, „National Research Foundation“ (NRF) vladin je odjel koji je kreirao 3D semantički model u kojem se značenje podataka može povezati sa stvarnim svijetom, prikazujući atribute zemljišta, karakteristike različitih oblika prijevoza te primjerice komponente različitih infrastruktura. Osim tih tipičnih podataka, platforma „Virtual Singapur“ uključuje prikaz dinamike u stvarnom vremenu, kao i informacije o klimi, prometu te demografiji. Uz pomoć „IoT“ uređaja prikupljaju se podaci o temperaturi, pritisku, vlažnosti, osvjetljenju, razini buke te infracrvenoj temperaturi. To platformu čini sjajnim alatom koji nudi ogroman potencijal i koji se može koristiti u različite svrhe. Prikazi koji koriste 3D semantičko modeliranje mogu prikazati ceste, rubnike ili stepenice baš onakve kakve jesu. To je korisno pri dizajniranju novih rješenja. Mogu se vršiti "što ako" testiranja nad modelom grada, bez ikakvih stvarnih zahvata u fizičkom svijetu. „Virtual Singapore“ također je koristan za simuliranje izvanrednih situacija, kao što je to na primjer evakuacija stadiona ili trgovačkog centra, pri čemu se dolazi do najoptimalnijih protokola postupanja. Također je koristan za analizu različitih oblika prometa i obrazaca kretanja pješaka. U gradskoj četvrti Yuhua, ovaj alat iskorišten je za vizualizaciju različitih mogućnosti projektiranja pješačkog mosta preko jedne od glavnih prometnica kako bi se što bolje uklopio s postojećim parkom.



Slika 3.8 Scena „Virtual Singapore“ platforme (URL 8)

U Australiji možemo pronaći jedan zanimljiv primjer korištenja digitalnih dvojnika. Naime, „NSW Department of Primary Industries“ (DPI) i „CSIRO's Data61“ omogućili su prostorno praćenje širenja mišje pošasti koja je pogodila Australiju. To su napravili tako što su pripadajuće podatke integrirali u njihovog prostornog digitalnog dvojnika – „NSW Spatial Digital Twin“ (SDT). Vlasnici zemlje diljem države prijavljivali su brojeve miševa i područja

opažanja putem aplikacije „MouseAlert“ te putem website-a. Kvaliteta podataka ovisila je o volji zajednice. Podaci imaju znanstveno ograničenje zbog načina na koji su prikupljeni te načina s kojim su brojevi kvantificirani. Prema podacima „CSIRO-sa“, podaci prikupljeni od strane korisnika točan su pokazatelj opsega aktivnosti miševa. Skupovi podataka od interesa za detekciju pošasti miševa uključuju vlagu tla, vrstu usjeva i vjetar, a svi oni pružaju vrijedne informacije vlasnicima zemljišta, industriji i vladi u njihovim naporima da kontroliraju opseg ove pošasti. U budućnosti, planira se korištenje senzora kako bi se pratila aktivnost pošasti. U ovoj fazi razvoja bitnije je područje aktivnosti, nego sami brojevi. Senzorsku tehnologiju sve više koristi poljoprivredna industrija za praćenje lokalnih vremenskih uvjeta i vlage u tlu (URL9).



Slika 3.9 Prikaz opsega mišje pošasti na prostornom digitalnom dvojniku Australije (URL9)

Digitalni dvojnici mogu naći primjenu na gradilištima i rudnicima.

- Digitalni dvojnici na gradilištima

Digitalni dvojnik nekog gradilišta čini proces izgradnje jednostavnijim te omogućuje uštedu sredstava. Na primjer, upotrebom drona moguće je mapirati gradilište te kontinuiranim snimanjem pratiti napredak kako bi se imalo uvid da li napredak prati zadane rokove. Rekonstrukcijom građevine ona se može usporediti s planiranom izvedbom u BIM-u, što omogućuje poduzimanje odgovarajućih radnji za ispravljanje eventualnih odstupanja. Primjenom digitalnih dvojnika moguće je pratiti promjene iz sata u sat. Ranim otkrivanjem problema moguće je izvršiti detaljnu analizu povijesnih podataka, čime se dobiva jedna nova vrsta informacija za sve daljnje procese donošenja odluka. Voditelj projekta tada može rekonstruirati korake koji su doveli do pogreške te napraviti promjene kako bi se spriječila pojava sličnih grešaka. Nadalje, jedan Institut za građevinsku industriju napravio je istraživanje 2017. godine koje je pokazalo da se oko 25% produktivnog vremena gubi na nepotrebno kretanje i rukovanje materijalima. Također, praćenjem rada strojeva dobiva se uvid u njihovu iskorištenost koju svaka tvrtka želi maksimalno povećati. Digitalni dvojnik bi omogućio praćenje raspodjele resursa i otpada, omogućujući prediktivni i štedljiv pristup pri njihovom upravljanju. Na taj način bi se u svakom trenutku znalo gdje se što nalazi na gradilištu. Tvrtke bi izbjegle prekomjernu dodjelu resursa i dinamički predviđale zahtjeve za njima. Time bi se izbjegla potreba za premještanjem resursa na velike udaljenosti te bi se bolje upravljalo vremenom. Sve to rezultira velikim financijskim uštedama. Digitalni dvojnik omogućio bi praćenje ljudi i opasnijih mjesta na gradilištu, čime bi se spriječilo neprikladno ponašanje, korištenje nesigurnih materijala te aktivnosti u opasnim zonama. Tvrtka može razviti sustav ranog obavještanja, obavještavajući voditelja da se radnik nalazi u potencijalnoj opasnosti te šaljući obavijest o opasnosti u blizini na radnikov uređaj. Praćenje kretanja radnika, odnosno njihova lokacija, može biti ključna informacija za spasilačke ekipe u slučaju nužde (URL 10).

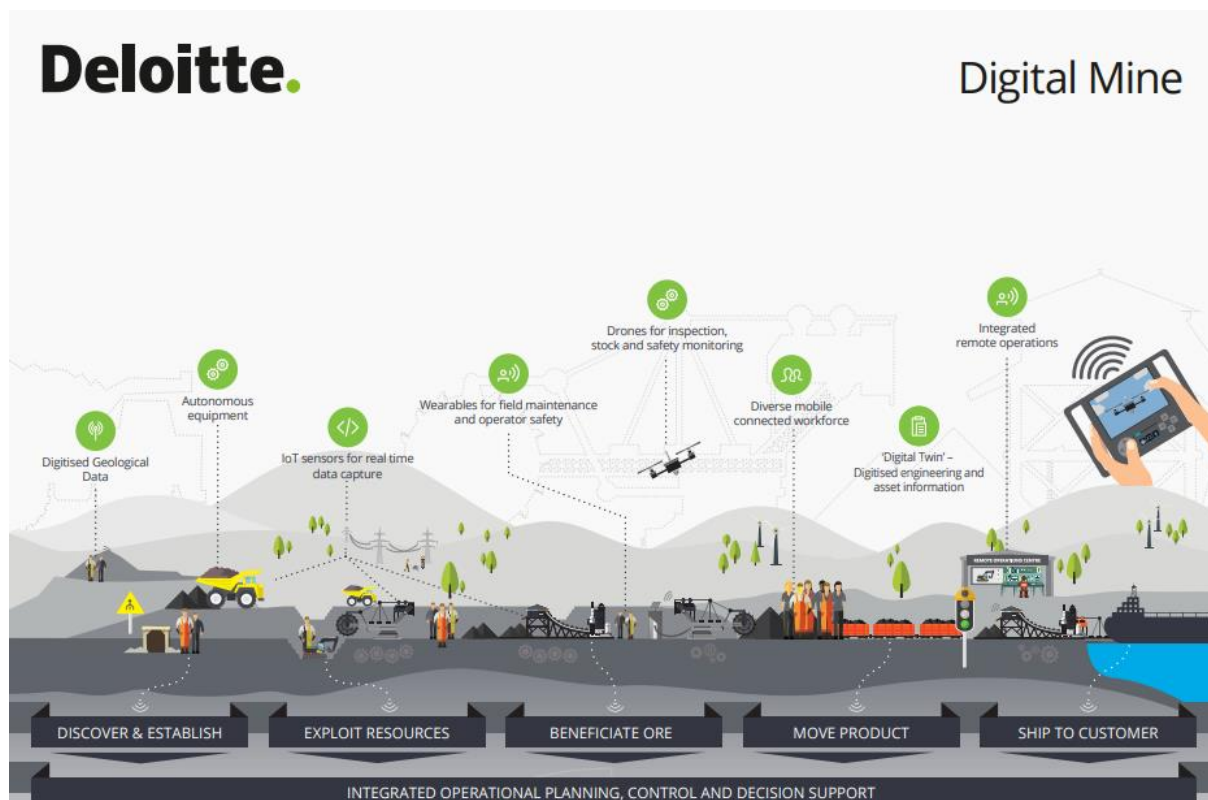
- Digitalni dvojnici u rudnicima

Tvrtka „Deloitte“ provela je istraživanje u kojem je obrađena tema digitalizacije rudnika. Istraživanje govori o tome kako rudarske organizacije mogu iskoristiti prednosti digitalne tehnologije za stvaranje vrijednosti. U digitalnom rudniku (Slika 3.10), svi operativni elementi su međusobno povezani. Brz napredak u tehnologiji te žudnja za smanjenjem troškova čimbenici su upotrebe digitalnih dvojnika u rudarskoj industriji u toj mjeri da oni sada postaju imperativ. Postoji pet ključnih čimbenika u jezgri operativnog procesa digitalnih rudnika:

- automatizacija i daljinsko upravljanje – velike rudarske kompanije pokazale su kako autonomna rudarska oprema i operacije upravljane na daljinu mogu poboljšati sigurnost, produktivnost te osigurati smanjenje troškova u operacijama velikih razmjera,
- prikupljanje podataka u stvarnom vremenu – napredna „IoT“ tehnologija pruža niz mogućnosti za rudarsku industriju, kao na primjer: povezivanje uređaja u mrežu, prikupljanje podataka u stvarnom vremenu pomoću senzora, integrirano planiranje te veća kontrola i podrška pri donošenju odluka. Ove značajke ne zahtijevaju velika ulaganja i sve više spadaju u ponudu opreme proizvođača i pružatelja usluga,
- tehnologija digitalnih dvojnika – digitalni model fizičkog okoliša izrađen korištenjem geoloških, inženjerskih i imovinskih informacija, kontinuirano je ažuriran podacima senzora i mobilnih uređaja svjesnih lokacije. Rezultat je bolje planiranje, predviđanje i simulacija budućih ishoda. Digitalni dvojnik ne mora pokrivati sve operacije koje se

događaju na terenu. Pažnja se može usmjeriti tamo gdje je potencijalna vrijednost najveća,

- dronovi – kako se sposobnost bespilotnih letjelica povećava te njihova cijena smanjuje, prikladni su za prikupljanje podataka, inspekciju, kontrolu zaliha te za nadzor stanja i sigurnosti,
- nosivi uređaji – sličan napredak doživjeli su i nosivi uređaji, čije mogućnosti se mogu upotrijebiti na terenu za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu i pregled strojeva.



Slika 3.10 Prikaz ključnih čimbenika operativnog procesa digitalnog rudnika (Klein i dr., 2017)

Prema podacima iz 2017. godine, rudarska kompanija „Resolute Mining“ planira svoj rudnik zlata „Syama“ u državi Mali učiniti prvim primjerom podzemnog rudnika budućnosti. Cilj je uspostaviti potpuno automatizirano punjenje i vuču, automatizirano upravljanje vozila i proizvodnje, praćenje stanja na terenu u stvarnom vremenu te praćenje i analizu podataka. Očekuje se da će time postići poboljšanu sigurnost, veću produktivnost te niže operativne troškove. Izvrstan primjer isplativosti uspostave digitalnog dvojnika za praćenje podataka u stvarnom vremenu dočarala je tvrtka „Evolution Mining“ poboljšavši prosječnu vrijednost tereta kojeg nosi jedan kamion za 4%.

Nadalje, digitalni dvojnici od iznimne su koristi prilikom inspekcija raznih objekata. Primjerice, tvrtka „Bentley“, koja je omogućila softver za izradu ovog istraživanja, ukazala je na iznimnu praktičnost i profitabilnost upotrebe digitalnih dvojnika prilikom inspekcije mostova. Održavanje mostova važno je za javnu sigurnost, a vlasnici mostova i inženjeri moraju obavljati redovite inspekcije kako bi utvrdili strukturni integritet mostova, u svrhu održavanja i sanacije istih. Tradicionalni vizualni pregledi koji se provode na licu mjesta su radno intenzivni, mogu zahtijevati skupu opremu, često zahtijevaju zatvaranje traka, predstavljaju sigurnosne rizike te mogu biti netočni i skloni pogreškama. „Bentley“ je u suradnji s „Microsoftom“ pomogao odjelima za promet u izvođenju virtualnih inspekcija mostova pomoću softvera „AssetWise“, kreiranja digitalnog dvojnika u softveru „ContextCapture“ te „Microsoft-ovih“ specijalnih naočala za proširenu stvarnost, „HoloLens2“. Provođenjem inspekcija korištenjem digitalnog dvojnika, uz impresivne inspeksijske mogućnosti uređaja „HoloLens2“, inspektori odjela za promet u mogućnosti su provesti do 90% inspekcije u svom uredu. Ovakva praksa skraćuje vrijeme na terenu, čineći cjelokupnu inspekciju bržom, učinkovitijom, sigurnijom i jeftinijom.



Slika 3.11 Digitalni dvojnik mosta u Minneapolisu u softveru „ContextCapture“ (URL 11)

U SAD-u nalazi se više od 600 000 mostova, koji su ključni dio infrastrukture. Koristeći dronove kako bi prikupili snimke visoke rezolucije, Bentley je u stanju izraditi iznimno precizne digitalne dvojnike (Slika 3.11). Detalji prilikom inspekcija su iznimno bitni. Integrirajući „Azure“ softver, „Bentley“ stvara vjerodostojne modele u stvarnom vremenu. Stručnjaci iz različitih područja u mogućnosti su imati uvid u sve dijelove mosta, istovremeno. Kombinirajući „Bentley“ rješenje s „HoloLens2“ uređajem, inspektori i inženjeri mogu pregledavati pojedine dijelove mosta te dodavati prostorne bilješke, s ciljem davanja detaljnog izvješća o objektu. Koristeći ovu metodu, ušteda ukupnih radova po svakoj inspekciji može doseći 40%. Savezna država Minnesota preuzela je inicijativu. U njoj se nalazi preko 20 000 mostova te je vrlo bitno vršiti inspekcije kako bi se pratilo njihovo stanje tijekom čitavog životnog ciklusa, a ujedno i dobila informacija o dotrajalosti objekta kako bi ga se pravovremeno saniralo ili zamijenilo. U suradnji s brojnim stručnjacima, ta savezna država planira uštedjeti 4 milijuna dolara na godišnjoj razini! Ta značajna uštedjena sredstva mogu se preusmjeriti, primjerice u proces obnove već pomalo zastarjele infrastrukture.

„HoloLens2" uređaj omogućuje uvid u stanje na terenu, bez potrebe izlaska stručnjaka na isti. Kombinacija ovog uređaja i tehnologije za stvaranje digitalnog dvojnika, može se reći da se most sa terena prebacio u ured, kao što se to vidi na slici 3.12. Pri inspekciji digitalnog dvojnika mosta, moguće je primjerice izmjeriti duljinu i širinu pukotina s iznimnom preciznošću. Na krilima ove tehnologije, moguće je istinski, precizno i geometrijski pratiti promjene koje se događaju s vremenom.

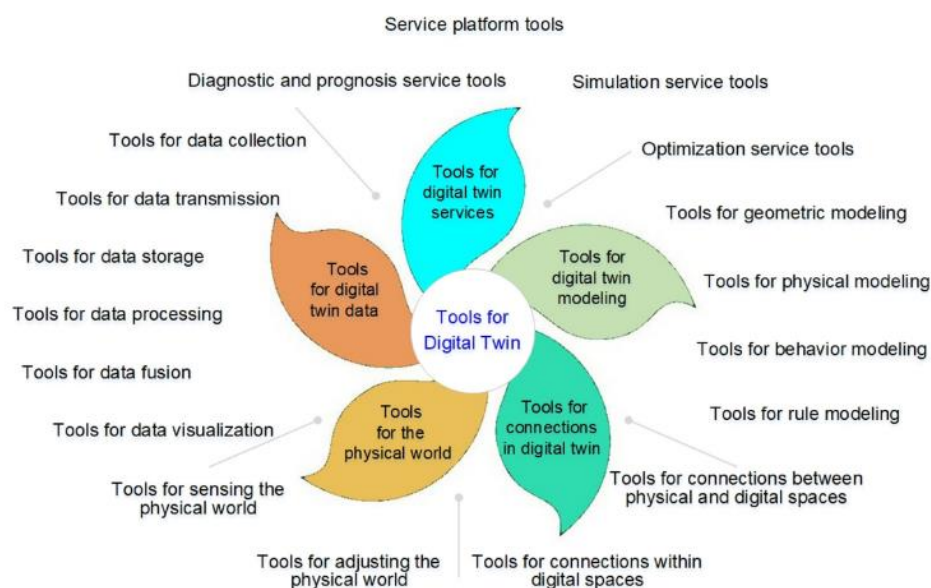


*Slika 3.12 Vizualizacija mosta u uredu pomoću „HoloLens2" uređaja (URL 11)*

## 4. ALATI I PODACI POTREBNI ZA USPOSTAVU DVOJNIKA

Kao što je prikazano na slici 4.1, digitalni dvojnici može se sagledati kroz prizmu pet-dimenzionalnog modela što znači da postoji 5 skupina alata potrebnih za njegovu uspostavu:

- alati za spoznaju i kontroliranje fizičkog svijeta,
- alati za modeliranje digitalnih dvojnika,
- alati za upravljanje podacima digitalnih dvojnika,
- alati za primjenu usluga digitalnih dvojnika,
- alati za umrežavanje digitalnih dvojnika.



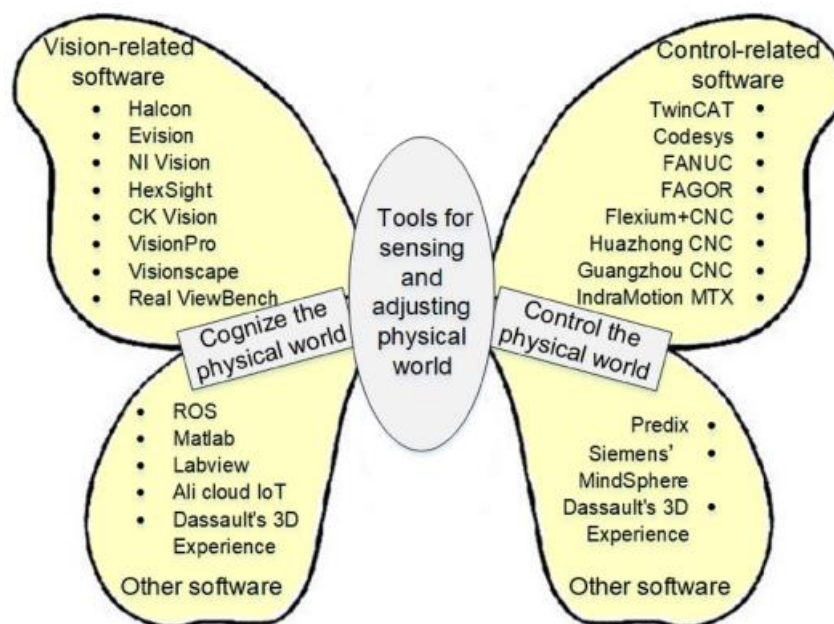
Slika 4.1 Alati za uspostavu digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019)

### 4.1 ALATI ZA SPOZNAJU I KONTROLIRANJE FIZIČKOG SVIJETA

Alati fizičkog aspekta digitalnih dvojnika mogu se podijeliti na alate za spoznaju i alate za kontrolu. Spoznaja različitih aspekata fizičkog svijeta temelj je digitalizacije. „IoT“ jedan je od pokretača digitalnih dvojnika. Kada su fizički entiteti upareni sa sustavima za opažanje i prikupljanje podataka, digitalni dvojnici pretvara te podatke u izvješća te u konačnici kao rezultat daje optimizirane procese i poslovne rezultate. Primjerice, „Ali Cloud IoT“ pruža pouzdan i siguran kapacitet opažanja senzorskim uređajima, omogućujući brz pristup multiplatformskim uređajima. Uz to, virtualni modeli paralelno rade s fizičkim sredstvima. Hranjeni podacima senzorskog opažanja, digitalni dvojnici imaju operativno ponašanje koje se razlikuje od simuliranog. Naftna kompanija u mogućnosti je „stream-ati“ senzorske podatke s morskih naftnih platformi koje rade kontinuirano.

„IoTSyS“ softver pruža stog komunikacijskih protokola za komunikaciju između pametnih uređaja. Podržava višestruke standarde i protokole, uključujući „IPv6“, „oBIX“, „6LoWPAN“ te učinkovite „XML formate“. Nadalje, većina alata za opažanje fizičkog svijeta su međusobno povezani. Na primjer, automatski upravljana vozila mogu koristiti „LIDAR“, dubinsku kameru,

GPS i mape uspostavljene kroz „ROS“ („Robot operating system“) softver za optimizaciju puta. Slični alati prikazani su na slici 4.2.



Slika 4.2 Alati za opažanje i kontrolu fizičkog svijeta (Qi i dr., 2019)

Alati za kontrolu fizičkog svijeta mogu učiniti fizičke entitete učinkovitijima i sigurnijima u njihovom radu na temelju povratnih informacija o njihovom trenutnom stanju. Do podataka o trenutnom stanju nekog entiteta dolazi se analizom i obradom percipiranih informacija u virtualnom svijetu. Digitalni dvojnik optimizira fizički dio putem kontroliranja njegova rada, odnosno davanjem konstantnih izvješća. Alati za izazivanje promjena u stvarnom svijetu su pod kontrolom. Primjerice, softver „TwinCat“ može pretvoriti gotovo svako kompatibilno računalo u kontroler u stvarnom vremenu. „SAP“ sustav pruža usluge održavanja i daljinske dijagnostike vozila za primarnog željezničkog prijevoznika u Italiji, „Trenitalia“. Izuzev toga, pruža optimalni operativni plan za "zdravstveno" stanje i stanje vožnje vlaka kroz dispečerski sustav. Slični softveri prikazani su na slici 4.2.

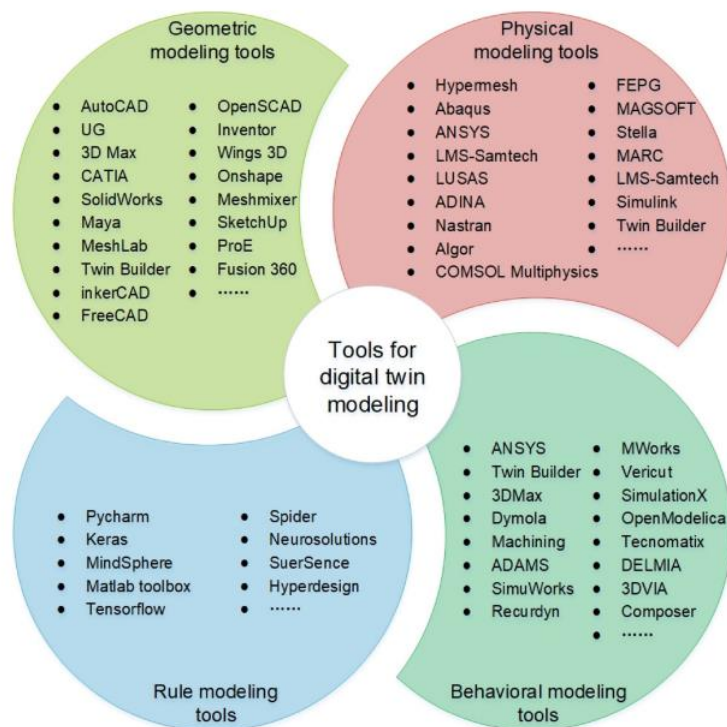
## 4.2 ALATI ZA MODELIRANJE DIGITALNIH DVOJNIKA

Virtualni modeli reprezentiraju sljedeće karakteristike nekog entiteta: fizička svojstva, geometrijska svojstva, različite značajke, ponašanje i pravila. Modeli uključuju geometrijske modele, fizičke modele, modele ponašanja te modele pravila. Sukladno tome, alati za modeliranje digitalnih dvojnika uključuju:

- alate za geometrijsko modeliranje,
- alate za fizičko modeliranje,
- alate za modeliranje ponašanja,
- alate za modeliranje pravila.

Alati za geometrijsko modeliranje služe za opisivanje oblika, veličine, položaja i montažnog odnosa između entiteta. Na temelju toga vrši se strukturalna analiza i planiranje proizvodnje.

Primjerice, uređaj za ispitivanje performansi digitalnog dvojnika CNC alatnog stroja uspostavljen je u softveru „SolidWorks”. Softver „3D Max” služi za 3D modeliranje, izradu animacija te vizualizaciju. „3D Max” se koristi za oblikovanje i definiranje detaljnih okruženja, objekata te se uvelike koristi kod oglašavanja, filma i televizije, industrijskog dizajna, arhitektonskog dizajna, 3D animacije, multimedijske produkcije, igara te ostalih inženjerskih područja. Uobičajeni alati za geometrijsko modeliranje prikazani su na slici 4.3.



Slika 4.3 Alati za geometrijsko modeliranje (Qi i dr., 2019)

Alati za fizičko modeliranje koriste se za izgradnju fizičkih modela putem pridodavanja fizičkih karakteristika fizičkih entiteta geometrijskim modelima. Tada se fizičko stanje fizičkih entiteta može analizirati kroz takav model. Na primjer, kroz analizu konačnih elemenata, pomoću softvera izrađenog od strane „ANSYS-a”, podaci senzora mogu se koristiti za definiranje graničnih uvjeta u stvarnom vremenu za geometrijske modele te za integriranje koeficijenta istrošenosti ili degradaciju u performansama unutar modela. „Simulink” može biti korišten za kreiranje fizičkih modela koristeći multi-domenske alate za modeliranje. Modeliranje pomoću „Simulinka” uključuje više modela te mehaničke, hidraulične i električne komponente. Slični softverski alati prikazani su na slici 4.3.

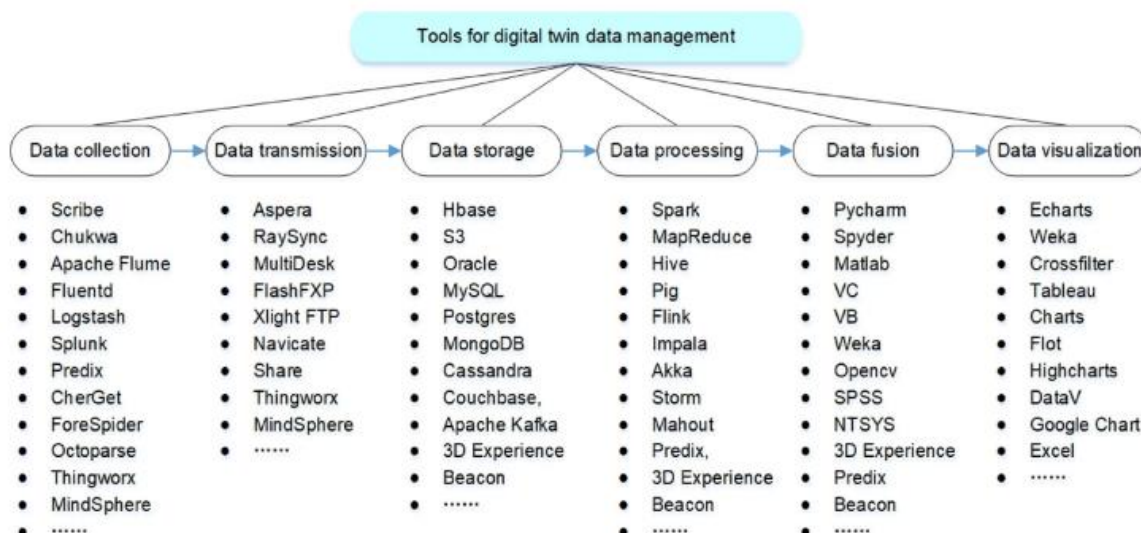
Alati za modeliranje ponašanja koriste se za uspostavu modela koji je osjetljiv na vanjske čimbenike i čimbenike smetnji te poboljšava simulacijski servis performansi digitalnih dvojnika. Na primjer, na temelju „PLC” platforme „CoDeSys”, može se konstruirati sistem za kontrolu pokreta CNC alatnog stroja. Sustav kontrole pokreta može komunicirati informacijama s više-domenskim modelom troosnog CNC stroja uspostavljenog u softveru „MWorks”. Na taj način može ostvariti kontrolu kretanja CNC alatnog stroja po osima. Slični softverski alati prikazani su na slici 4.3.

Alati za modeliranje pravila mogu poboljšati uslužne performanse putem modeliranja logike, zakona i pravila fizičkog ponašanja. Zahvaljujući strojnom učenju, odgovarajući softveri u sposobnosti su pratiti senzore te automatski naučiti normalno stanje rada nekog entiteta. Na temelju naučenih pravila, digitalni dvojnik u stanju je prepoznati abnormalne radne uvjete, otkriti abnormalne uzorke te predvidjeti buduće trendove. Neki od softvera sposobnih za ovakvu vrstu modeliranja nalaze se na slici 4.3.

### 4.3 ALATI ZA UPRAVLJANJE PODACIMA DIGITALNIH DVOJNIKA

Podaci su nositelji informacija te ključni pokretač digitalnih dvojnika. Kao što je prikazano na slici 4.4, alati za upravljanje podacima uključuju:

- alate za prikupljanje podataka,
- alate za prijenos podataka,
- alate za pohranu podataka,
- alate za obradu podataka,
- alate za spajanje podataka,
- alate za vizualizaciju podataka.



Slika 4.4 Alati za upravljanje podacima digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019)

Alati za prikupljanje podataka moraju dobiti potpune, stabilne i učinkovite podatke putem ispravnog postavljanja senzora. Na primjer, „DHDAS“ sustav je skup softvera za prikupljanje i analizu signala koji se potom analiziraju i obrađuju. Softver se može upariti s raznim modelima te prikuplja njihove podatke u stvarnom vremenu. Slični softverski alati prikazani su na slici 4.4.

Svrha alata za prijenos podataka je ostvariti prijenos podataka u stvarnom vremenu, pazeći pri tome da informacije o podacima ne nedostaju te da nisu oštećene. Trebaju zadržati autentičnost podataka u najvećoj mjeri. Pošto živimo u eri velikih količina podataka, rješenja prijenosa podataka trebaju zadovoljiti aspekte brzine i pouzdanosti. Reprezentativni alat takve funkcije je „Aspera“ koja koristi postojeću „WAN“ infrastrukturu za prijenos podataka. „Aspera“ je poznata po sposobnosti da prenese velike količine podataka na velikim udaljenostima , a pri

tome joj loše stanje mreže ne predstavlja prepreku. Alternativni alati za prijenos podataka prikazani su na slici 4.4.

Pohrana podataka jamstvo je za provođenje naknadnih operacija. Time se ostvaruje klasifikacija i čuvanje podataka te je moguće pozivanje tih podataka u stvarnom vremenu. Tehnologija pohrane doživjela je brz razvoj u posljednje vrijeme. Izvrstan primjer je „HBase” baziran na „Hadoop” platformi. „Hbase” je izuzetno pouzdana, visokoučinkovita, na stupce orijentirana i skalirajuća baza podataka za čitanje i pisanje u stvarnom vremenu. Podržava pohranu polu-strukturiranih i nestrukturiranih podataka uz visoku dostupnost. Slični sustavi za pohranu podataka nalaze se na slici 4.4.

Obrada podataka eliminira smetnje i kontradiktorne informacije, čineći podatke dostupnima za učinkovitu upotrebu. Na primjer, „Spark” je računalni softver otvorenog koda koji ima sposobnost obrade podataka u stvarnom vremenu. Podržava aplikacije pisane u različitim jezicima poput „Java-e”, „Scala-e” i „Python-a”. Slični softveri za obradu podataka prikazani su na slici 4.4.

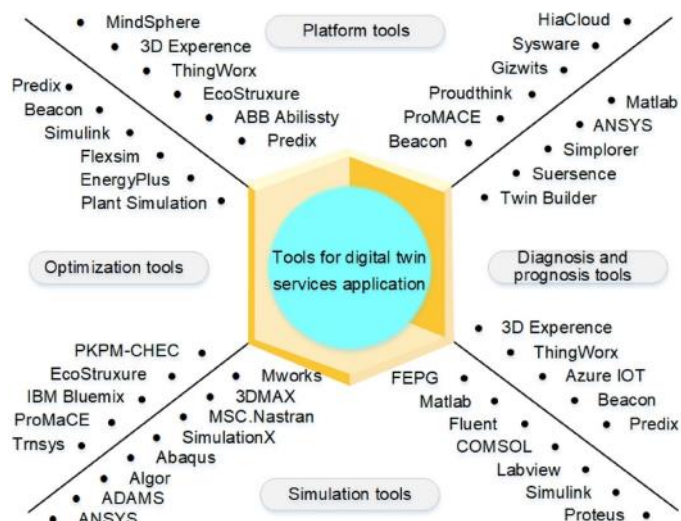
Fuzija podataka integrira, filtrira, korelira te sintetizira obrađene podatke kako bi pomogla pri prosudbi, planiranju, provjeri i dijagnozi podataka. Primjer često korištenog alata je „Spyder” koji spaja podatke. Drugi softver „Pycharm” može poboljšati produktivnost pri otklanjanju pogrešaka, upravljanju projektom i ostalom. Ostali alati opremljeni fuzijskim sposobnostima prikazani su na slici 4.4.

Vizualizacija podataka pruža osoblju uredne, intuitivne i jasne podatke za praćenje u stvarnom vremenu. Softver otvorenog koda „Echarts” može se lako pokrenuti na računalima i mobilnim uređajima i kompatibilan je s većinom aktualnih preglednika. Pruža živopisne i prilagođene vizualizacije za dinamične i velike obujme podataka. Slični alati prikazani su na slici 4.4.

#### **4.4 ALATI ZA PRIMJENU USLUGA DIGITALNIH DVOJNIKA**

Alati za primjenu digitalnih dvojnika, prikazani na slici 4.5, mogu se klasificirati na:

- servisni alate platforme,
- servisni alate simulacije,
- servisne alate optimizacije,
- servisne alate za dijagnostiku i prognozu.



Slika 4.5 Alati za primjenu usluga digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019)

Alati platforme integriraju velike količine podataka, "Internet of things" te umjetnu inteligenciju. Primjerice, platforma „Thingworx" povezuje digitalne dvojnike s proizvodima u radu kako bi prikazala podatke prikupljene uz pomoć senzora te analize rezultata putem web aplikacija. „HIROTEC", vrhunski dobavljač opreme i dijelova za automatizaciju proizvodnje, pomoću ove platforme ostvario je vezu između operativnih podataka CNC stroja i podataka „ERP" („Enterprise Resource Planning") sustava, čime je postignuto učinkovito smanjenje vremena zastoja opreme. „Siemens" je lansirao platformu „MindSphere". Platforma je u stanju prenositi podatke prikupljene sensorima industrijskih uređaja na terenu, kontrolera te raznih informacijskih uređaja u takozvani oblak podataka u stvarnom vremenu. Prijenos se odvija putem sigurnih kanala te se pružaju velike podatkovne analize i rudarenje podataka te usluge s dodatnom vrijednošću za poduzeća. Slični alati prikazani su na slici 4.5.

Alati za dijagnostiku i prognozu pružaju strategiju inteligentnog prediktivnog održavanja opreme te smanjenje vremena zastoja uz pomoć analiziranja i procesiranja podataka digitalnog dvojnika. Na primjer, „ANSYS" simulacijska platforma pomaže korisnicima da samostalno dizajniraju „IoT" povezane sustave i analiziraju operativne podatke, kreirane pomoću tih pametnih uređaja. Usporednu se analiziraju podaci iz faze dizajniranja kako bi se omogućilo prediktivno održavanje. Sustav „MATLAB" može se koristiti za određivanje preostalog korisnog vijeka trajanja kako bi se izvršio servis ili zamjena opreme u najprikladnijem trenutku. Primjerice, velika uslužna tvrtka „Baker Hughes" koja pruža usluge i proizvode industriji za razvoj nafte, koristeći se platformom „MATLAB" razvila je alarm za prediktivno održavanje. Slični alati za dijagnostiku i prognozu prikazani su na slici 4.5.

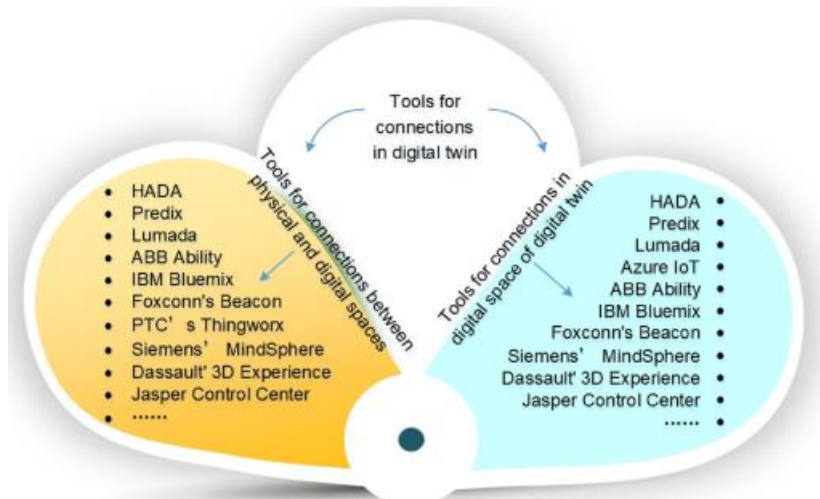
Koristeći podatke digitalnog dvojnika, kao što su senzorski podaci, troškovi energije ili faktori izvedbe, alati za optimizaciju pokreću stotine " što ako " simulacija za procjenu stanja i spremnosti na zadane uvjete odgovarajućeg sustava. To omogućuje optimizaciju i kontrolu operacija sustava tijekom rada čime se smanjuju rizik, troškovi te potrošnja energije, a ujedno dolazi do povećanja učinkovitosti. „Siemensov" softver „Plant Simulation" za simulaciju postrojenja može optimizirati raspored proizvodne linije i raspored tvornice. Još jedan dobar primjer ove vrste alata je „Simulink" koji prima izmjerene podatke pa potom pokreće tisuće

simulacijskih scenarija kako bi utvrdio da li je energetska rezerva dostatna te preispituje treba li prilagoditi regulatore sustava. Slični alati za optimizaciju prikazani su na slici 4.5.

Napredni alati za simulaciju ne samo da mogu obavljati dijagnostiku i odrediti prednosti održavanja, već su u stanju prikupiti informacije te ih iskoristiti za unaprjeđenje dizajna sljedeće generacije. Primjerice, ukoliko nedostaje odgovarajuća analiza u fazi dizajniranja CNC alatnog stroja, stroj će otkazati zbog vibracija. S druge strane, ako dodamo materijal s ciljem ojačavanja strukture i smanjenja vibracija, cijena stroja u proizvodnji iziskivala bi velik trošak. Međutim, izvršavanjem odgovarajuće analize strukture stroja u, na primjer, softveru „ANSYS" koji će posvetiti pažnju troškovima i kvaliteti performansi uređaja, dolazi se do rješenja koja unaprjeđuju sljedeće generacije proizvoda. Slični alati poput „ANSYS-a" nalaze se na slici 4.5.

#### 4.5 ALATI ZA UMREŽAVANJE DIGITALNIH DVOJNIKA

Alati za povezivanje služe za spajanje fizičkog i virtualnog svijeta, kao i za povezivanje različitih dijelova digitalnih dvojnika. Srž svakog digitalnog dvojnika je razbijanje granica između fizičke i virtualne stvarnosti, odnosno njihovo međusobno povezivanje. Primjerice, „PTC Thingworx" može djelovati kao svojevrsni posrednik između senzora i virtualnih modela, povezujući pritom razne pametne uređaje u jedan „IoT" ekosustav. „Siemensov" otvoreni „IoT" operativni sustav „MindSphere", temeljen na oblaku podataka, povezuje proizvode, postrojenja, sustave te strojeve. Koristi naprednu analizu kako bi omogućio bogatstvo podataka koje generira „IoT". „Jasper Control Center" kontinuirano prati mrežne uvjete, ponašanja uređaja te status „IoT" usluge kako bi se osigurala visoka pouzdanost usluge kroz dijagnostiku u stvarnom vremenu te aktivno praćenje statusa povezanosti. Povezanost znači komunikacija, interakcija i razmjena informacija između fizičkog entiteta, podatkovnog centra, usluge i virtualnog modela. To je ključno za dijagnostiku i rješavanje problema, određivanje idealnog plana održavanja te optimiziranje performansi fizičkog entiteta. Na primjer, „Microsoftov" „Azure IoT Hub" omogućio je „Rolls-Royceu" izradu modela motora te provođenje analize podataka na temelju strojnog učenja. Na taj način mogu se detektirati anomalije na komponentama koje su pred kvarom te poduzeti odgovarajući postupci. Popis najpoznatijih alata ove vrste nalazi se na slici 4.6.



Slika 4.6 Alati za umrežavanje digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019)

Primjena digitalnih dvojnika kompleksan je i dugotrajan proces. Zahtijeva zajednički rad više tehnologija i alata. Na primjer, reprodukcija vjetrenjače zahtijeva praćenje različitih podataka (vibracijski signali, akustični signali, električni signali itd.) mjenjača, generatora, lopatica, ležajeva, vratila, tornja i pretvarača energije, kao i uvjeta koji vladaju na terenu (brzina vjetra, smjer vjetra, temperatura, vlažnost i tlak). Potrebno je izraditi mnogo virtualnih modela kako bi se reproducirala vjetroturbina. Geometrijski model, model ponašanja, funkcionalni model, model pravila, model dijagnoze kvarova, model predviđanja vijeka trajanja samo su neki od njih. Za svaki navedeni neophodna je prikladna tehnologija i alati. Na primjer, za prikupljanje raznih signala potrebna je senzorska tehnologija. Prijenos podataka, pohrana, obrada i fuzija mogu koristiti „5G“, „NewSQL“, tehnologije umjetne inteligencije i slično. Geometrijski modeli mogu se izraditi pomoću alata kao što su „SolidWorks“, „AutoCAD“, „CATIA“ i drugi. Iz svega navedenog, može se zaključiti da digitalni dvojnici uključuju širok raspon tehnologija i alata koji su izumljeni ili razvijeni od strane različitih tvrtki. Postoje različiti protokoli i standardi u vezi tih tehnologija i alata. Da bi se omogućio zajednički rad alata neophodnih za funkcioniranje sustava digitalnih dvojnika, podaci i modeli trebaju biti standardizirani i isporučeni u uniformnim protokolima i standardima. Na taj način omogućava se svim tehnologijama i alatima rad za zajednički cilj.

## 5. CONTEXTCAPTURE CONNECT EDITION

### 5.1 OPIS SOFTVERA CONTEXTCAPTURE

Bentley Systems je tvrtka za razvoj softvera koji podržavaju zahtjevne profesionalne potrebe stručnjaka na polju geoprostorne industrije. Rješenja koja njihovi softveri nude daju podatke o nekom entitetu tijekom njegovog životnog ciklusa. Ona su korištena od strane inženjera, arhitekata, geoprostornih stručnjaka, planera, IT stručnjaka, inženjera za održavanje te svih drugih koji rade na nekom entitetu tijekom njegova postojanja. Svaki proizvod dizajniran je tako da osigura protok informacija između projektnog procesa i članova projektnog tima. Jedno od takvih rješenja je i softver „ContextCapture“. Ovaj softver nije besplatan za korištenje. Tvrtka „Bentley“ ustupila je licencu u trajanju od godinu dana u svrhu izrade praktičnog dijela istraživanja.

„ContextCapture“ pruža snažne mogućnosti integriranja i procesiranja podataka realnog modeliranja. Realno modeliranje je proces pretvaranja fizičke stvarnosti u digitalnu reprezentaciju koja se potom održava putem različitih ispitivanja. „Bentley-ev“ softver daje digitalni kontekst stvarne scene u obliku 3D mreže stvarnosti. Idealan je za praćenje infrastrukturnog projekta tijekom procesa dizajniranja, izgradnje te održavanja. Omogućava nam da pomoću fotografija kreiramo isplative 3D modele bez obzira na zahtjevnost scene i uvjeta. Ukoliko želimo povećati točnost, model možemo obogatiti dodavanjem oblaka točaka dobivenim laserskim skeniranjem. Time dobivamo finije detalje, oštrije rubove, odnosno veću geometrijsku preciznost. Uz dronove, skenere te različite druge senzore, snimke se mogu prikupiti i običnim pametnim telefonom (Slika 5.1).



Slika 5.1 Alati za prikupljanje ulaznih podataka softvera „ContextCapture“ (URL 12)

Preklapanjem fotografija dobivenih snimanjem dronovima ili nekim uređajem s razine zemlje, nadopunjenim laserskim skeniranjem ukoliko je potrebno, „ContextCapture“ generira geoprostorno referencirane 3D mreže. Modeli se kreiraju vrlo brzo te pružaju izrazito precizan kontekst stvarnog svijeta. Kreiranje modela temelji se na jedinicama za obradu grafike te na „multi-core“ računanju. Objekti koje možemo replicirati mogu biti veličine nekoliko centimetara pa sve do veličine čitavog grada. Kvaliteta, odnosno preciznost dobivenog modela, određena je rezolucijom fotografija koje smo prikupili.

„ContextCapture“ podržava nekoliko tipova pozicijskih podataka. Relativna pozicija i orijentacija svake fotografije automatski se identificira. Moguće je koristiti GPS oznake i kontrolne točke ako ulazni podaci nisu georeferencirani. Sve te opcije nam omogućavaju precizno mjerenje koordinata, udaljenosti, površina i volumena.

Softver se sastoji od 3 modula:

- ContextCapture Master,
- ContextCapture Engine,
- ContextCapture Acute 3D viewer.

„ContextCapture Master“ predstavlja grafičko sučelje unutar kojeg definiramo ulazne podatke, provodimo korake procesiranja, sagledavamo rezultate svakog koraka postupka te u konačnosti vizualiziramo rezultate.

„ContextCapture Engine“ je modul koji radi u pozadini te korisnik s njim nema nikakvu interakciju. Potrebno ga je pokrenuti prije pokretanja procesiranja na grafičkom sučelju „Master“ modula. Njegova zadaća je provođenje zahtjevnih algoritama tijekom izrade modela.

„ContextCapture Editor“ je „3D CAD“ modul za uređivanje i analiziranje konačno dobivenog modela.

Princip rada ovog softvera možemo razlučiti na 4 modula:

- unošenje niza digitalnih fotografija statičnog objekta, snimljenih iz različitih kuteva gledanja. Također se mogu unijeti okviri video uratka te oblaci točaka,
- podešavanje dodatnih ulaznih vrijednosti: svojstva kamere (žarišna udaljenost, veličina senzora, glavna točka, distorzija leća), pozicija fotografija (primjerice GPS pozicija), rotacija fotografija (primjerice INS) te kontrolne točke,
- unutar nekoliko minuta/sati, ovisno o veličini ulaznih podataka, ContextCapture kao rezultat daje visoko preciznu triangulacijsku mrežu, bez potrebe manualne intervencije,
- dobivena triangulacijska mreža predstavlja točnu preciznu vizualnu i geometrijsku aproksimaciju onih dijelova objekata čiji su ulazni podaci, odnosno fotografije, pravilno prikupljeni.

## 5.2 PREPORUKE ZA PRIKUPLJANJE ULAZNIH PODATAKA

ContextCapture automatski pretvara fotografije u 3D model prikaza stvarnosti što znači da kvaliteta ulaznih podataka ima velik utjecaj na konačni rezultat.

Za postizanje najboljih mogućih rezultata koristeći softver „ContextCapture“, preporučuje se:

- konstantna žarišna udaljenost prilikom prikupljanja podataka: „zoomirati“ približavanjem objektu,
- ambijentalno, konstantno i homogeno svijetlo.

Preporučuje se izbjegavati:

- zamucene fotografije: koristiti prilagođene postavke, po mogućnosti tripod prilikom slabog osvjetljenja,
- bljeskalicu,
- optičku stabilizaciju.

Nikada koristiti:

- digitalni „zoom“,
- bilo kakvo uređivanje fotografija u vidu rezanja, promjene rotacije te promjene veličine.

Ukoliko želimo kao ulazni podatak koristiti video uradak, preporučeni formati su sljedeći:

- „Audio Video Interleave“ (AVI),
- „MPEG-1“/„MPEG-2“ (MPG),
- „MPEG-4“ („MP4“),
- „Windows Media Video“ (WMV),
- „QuickTime“ (MOV).

Preporuke pri prikupljanju podataka su sljedeće:

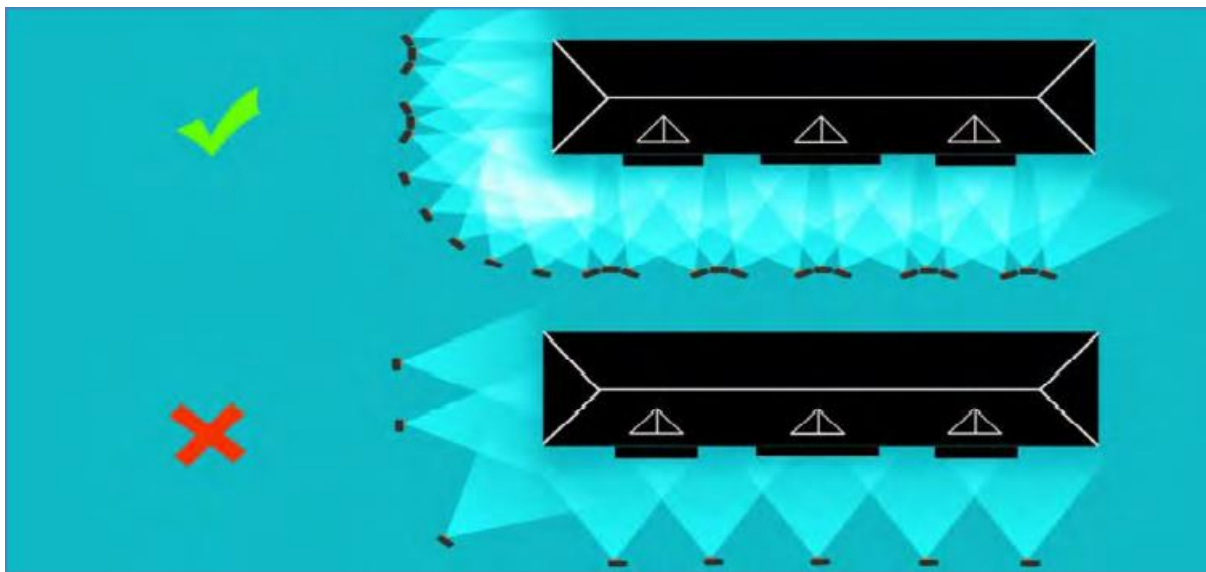
- koristiti odgovarajuću kameru koja će zadovoljiti zahtjeve,
- snimati pod prirodnim svjetlom, preporučuje se prilikom oblačnog vremena kako bi se ograničio utjecaj sjene,
- koristiti uvijek istu žarišnu udaljenost.

„ContextCapture“ podržava širok spektar kamera: mobilne kamere, kompaktne digitalne, DSLR, fotogrametrijske te sisteme s više kamera. Također, kao što je već navedeno, moguće je

procesirati ekstrahirane okvire video uratka. Za optimalne rezultate, najbolje je koristiti kamere s velikim sensorima i kvalitetnim lećama.

Način na koji prikupljamo fotografije je ključan za postizanje optimalnog rješenja. Svaki segment promatranog objekta trebao bi biti snimljen barem iz 3 različita kuta gledišta. Te 3 pozicije moraju biti različite, ali ne drastično. Kut između dvije točke snimanja ne bi smio prelaziti 15 stupnjeva. Potreban je preklop od minimalno 50%, ali najadekvatniji je 70%.

Prilikom snimanja zračnih fotografija, potrebno je ostvariti uzdužni preklop od 80% i bočni od 50%. Za postizanje najboljih rezultata, potrebno je snimiti vertikalne i bočne fotografije. Uvijek je dobro prije izlaska na teren izraditi plan leta.



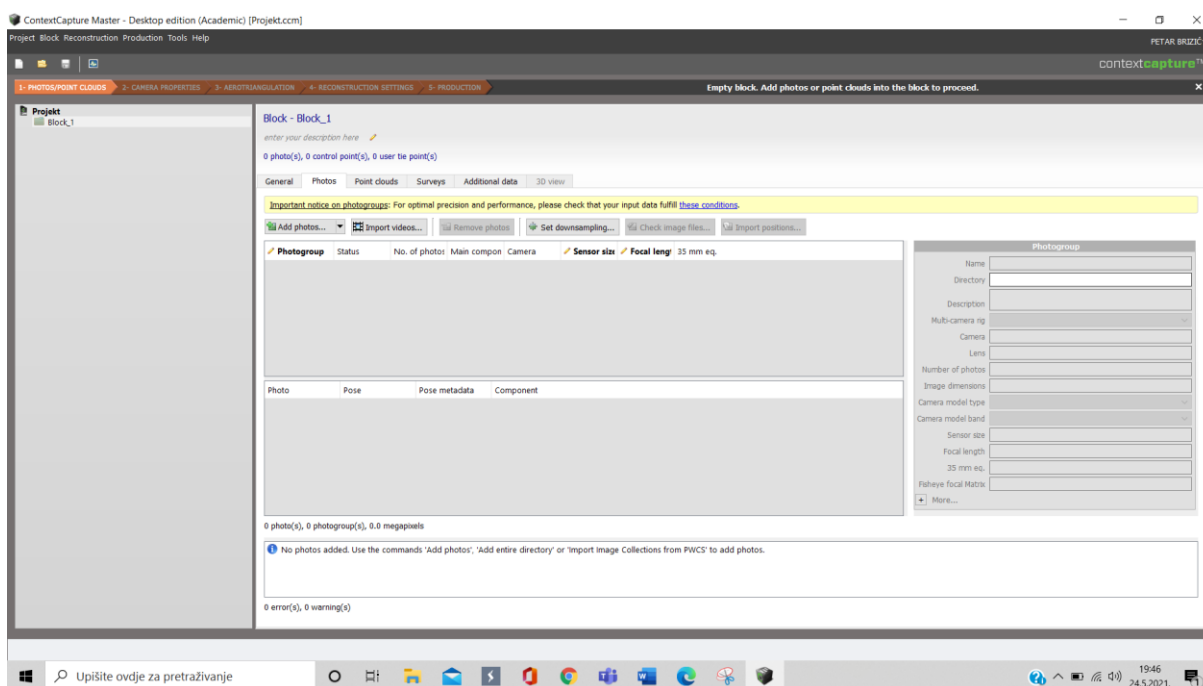
Slika 5.2 Prikaz ispravnog načina prikupljanja podataka (URL 12)

### 5.3 IZRADA TESTNOG PRIMJERKA DIGITALNOG DVOJNIKA RADIO UREĐAJA

U svrhu boljeg upoznavanja sa softverom, prije izrade digitalnog dvojnika silosa, izrađen je testni primjerak. Za predmet repliciranja odabran je model radio uređaja.

Prikupljanje fotografija izvršeno je uz pomoć mobilnog uređaja. Model uređaja koji se koristio je „Iphone 12“. Sveukupno je snimljeno 70 fotografija prema gore navedenim pravilima. Radio uređaj je fotografiran kružno s 3 visine. Snimanje je izvršeno u zatvorenom prostoru u uvjetima dnevnog svjetla. Nužne specifikacije kamere potrebne za izvršenje zadatka softver je automatski prepoznao u EXIF podacima prilikom učitavanja fotografija.

Prvi korak je pokrenuti modul „ContextCapture Master“. Odabere se opcija „New project“ te se projekt spremi u željenu datoteku. Tada se otvara sučelje programa (Slika 5.3).



Slika 5.3 Sučelje modula „ContextCapture Master“

Softver je podijeljen u 5 faza izrade :

- „photos“,
- „camera properties“,
- „aerotriangulation“,
- „reconstruction settings“,
- „production“.

Fotografije unosimo pomoću naredbe „Add photos“ ili „Add entire directory“ ako se sve nalaze u istoj mapi. Nužne specifikacije kamere potrebne za izvršavanje zadatka softver je automatski preuzeo iz EXIF podataka prilikom učitavanja snimki. Uz veličinu senzora i žarišnu udaljenost, također je učitana i pozicija fotografija. Softver sadrži preko 4000 prostornih referentnih sustava, a moguće je i definirati vlastiti. Važno je da su ulazni podaci georeferencirani. Da nisu, dobiveni model ne bi bio skaliran i ispravno orijentiran.

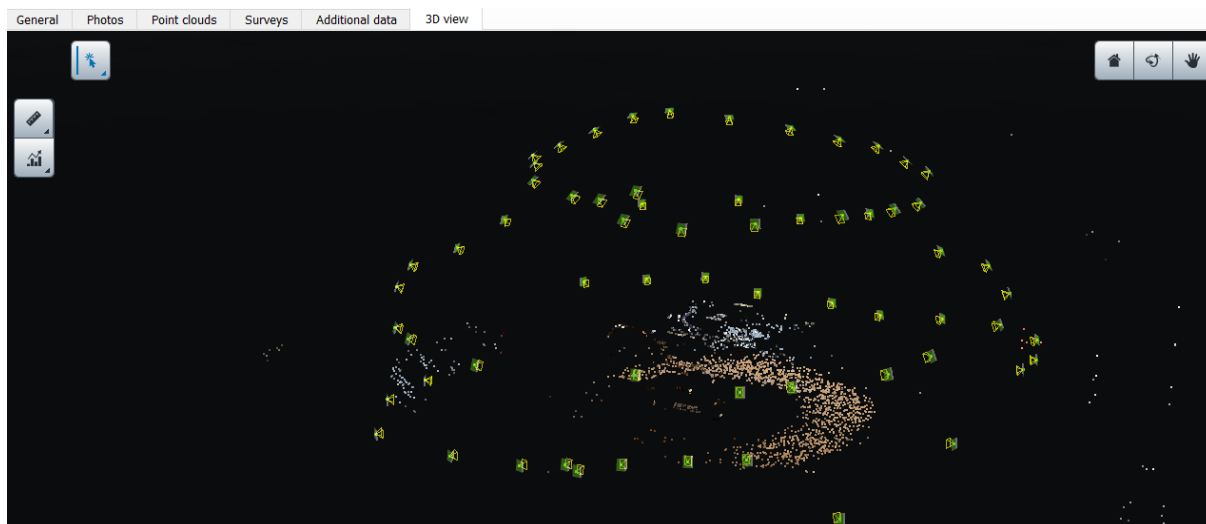
Uspješnim učitavanjem fotografija te nakon što je softver provjerio svojstva fotografija i njihovu kvalitetu, završena su prva dva koraka. Na sučelju se pojavila mapa „Block\_1“. Sljedeći korak je provođenje automatske aerotriangulacije. „ContextCapture“, odnosno „ContextCapture Engine“ analizira svaku fotografiju pojedinačno. Cilj je pronaći zajedničke specifične značajke na snimkama koje se preklapaju. U suštini, softver nastoji triangulirati značajku koja se nalazi na barem tri fotografije kako bi odredio njen položaj u prostoru. „ContextCapture“ je u stanju pronaći tisuće takvih značajki kojima dodjeljuje poziciju u 3D prostoru. Kvaliteta snimki iznimno je važna kako bi softver uspio definirati sve značajke te ih smjestiti u prostor.

Prije pokretanja procesa aerotriangulacije, potrebno je uključiti modul „ContextCapture Engine“ koji radi u pozadini te provodi zahtjevne algoritme. Izrada modela od strane korisnika je bazirana na modulu „ContextCapture Master“, dok modul „ContextCapture Engine“ vrši svoju funkciju samostalno.

Za pokretanje postupka, potrebno je stisnuti opciju „Submit aerotriangulation“. Tada dolazi do pojavljivanja izbornika:

- „output block name“,
- „positioning/georeferencing“,
- „settings“.

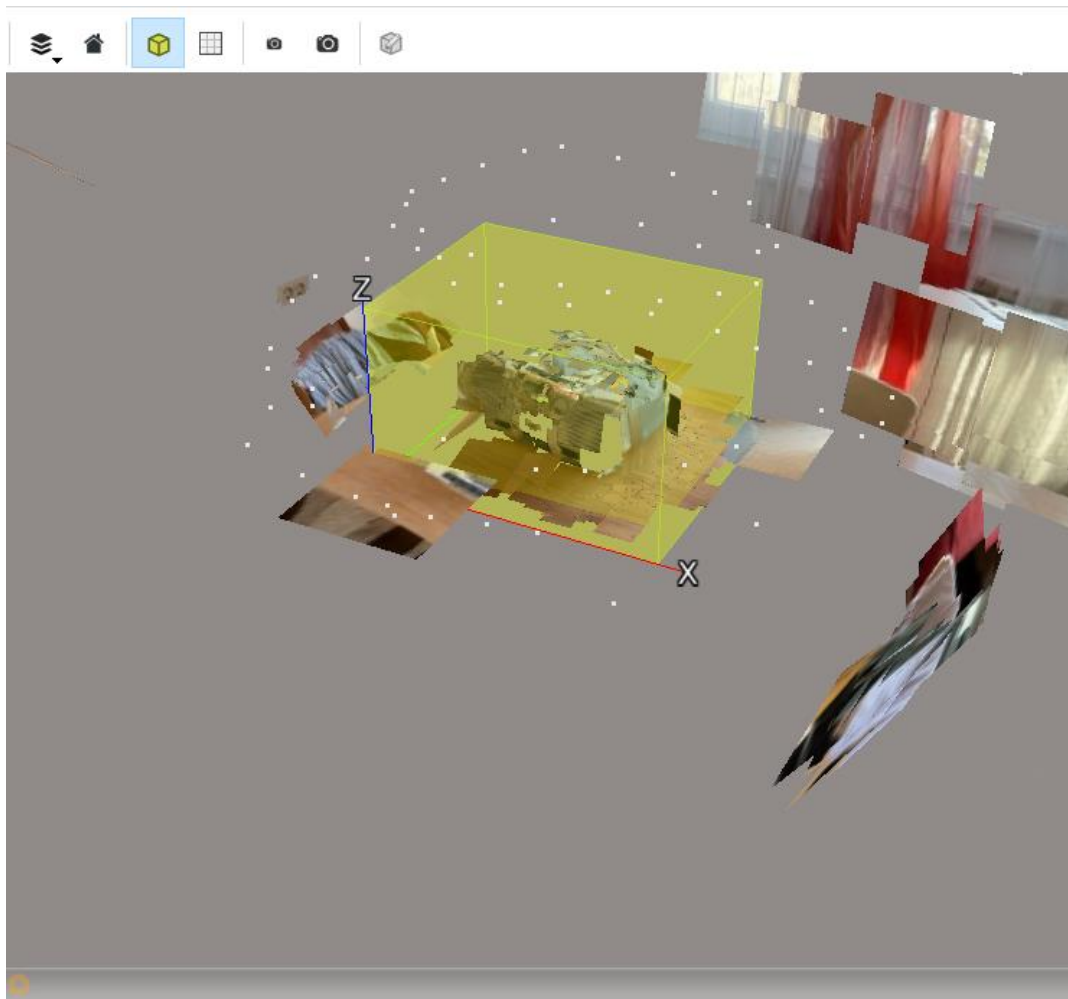
Unutar prvog izbornika odabire se mapa unutar koje će se rezultati spremiti. U drugom izborniku, odabire se način na koji će aerotriangulacija prilagoditi i orijentirati blok fotografija. U ovom slučaju odabrano je da postupak bude odrađen pomoću metapodataka fotografija. Završne postavke postavljene su automatski (by default). „ContextCapture Engine“ tada obavlja svoj dio posla te provodi složene kalkulacije. Ovaj postupak zahtjevan je za CPU, ali pošto se radi o malom objektu, proces izrade traje samo nekoliko minuta. Nakon provedene aerotriangulacije, stvara se nova mapa „Block\_1-AT“ te softver daje izvještaj. Taj izvještaj nam govori da li je pozicioniranje izvršeno zadovoljavajuće. Također, obavještava nas da li je došlo do nekakve pogreške prilikom postupka. Pošto je prikupljanje podataka izvršeno zadovoljavajućom kvalitetom, pogrešaka u samome postupku provođenja aerotriangulacije nije bilo. U izvješću je također moguće vidjeti broj veznih točaka koje je softver iskoristio kako bi smjestio fotografije u 3D prostor. Rezultate aerotriangulacije moguće je vidjeti u izborniku „3D view“.



*Slika 5.4 Prikaz rezultata provedene aerotriangulacije*

Kako je ovo samo testni primjerak čija je svrha bila upoznavanje s programom, važno je istaknuti da rezultati nisu savršeni. Zeleni četverokuti (Slika 5.4) predstavljaju položaje u 3D prostoru s kojih je pojedina fotografija snimljena. Fotografije su snimljene s tri visine kružno. Kada kliknemo na pojedini četverokut, u donjem dijelu sučelja prikazana je fotografija snimljena s te pozicije. Svaka točka predstavlja veznu točku koju je softver prepoznao. Boje veznih točaka otprilike odgovaraju bojama objekta na tim pozicijama. Po formaciji veznih točaka da može se prepoznati oblik objekta.

Posljednja dva koraka, „reconstruction settings” i „production” odnose se na konačnu izradu modela. Prilikom definiranja postavki za završni korak izrade modela, opcija „Spatial framework” omogućava ograničavanje područja koje će proći kroz završnu obradu. Ograničavanje područja obrade vrši se uključivanjem opcije „Edit region” te horizontalnim ili vertikalnim pomicanjem 5 ploha (Slika 5.5). To omogućuje da se neki neželjeni sadržaj izbaci iz postupka obrade.

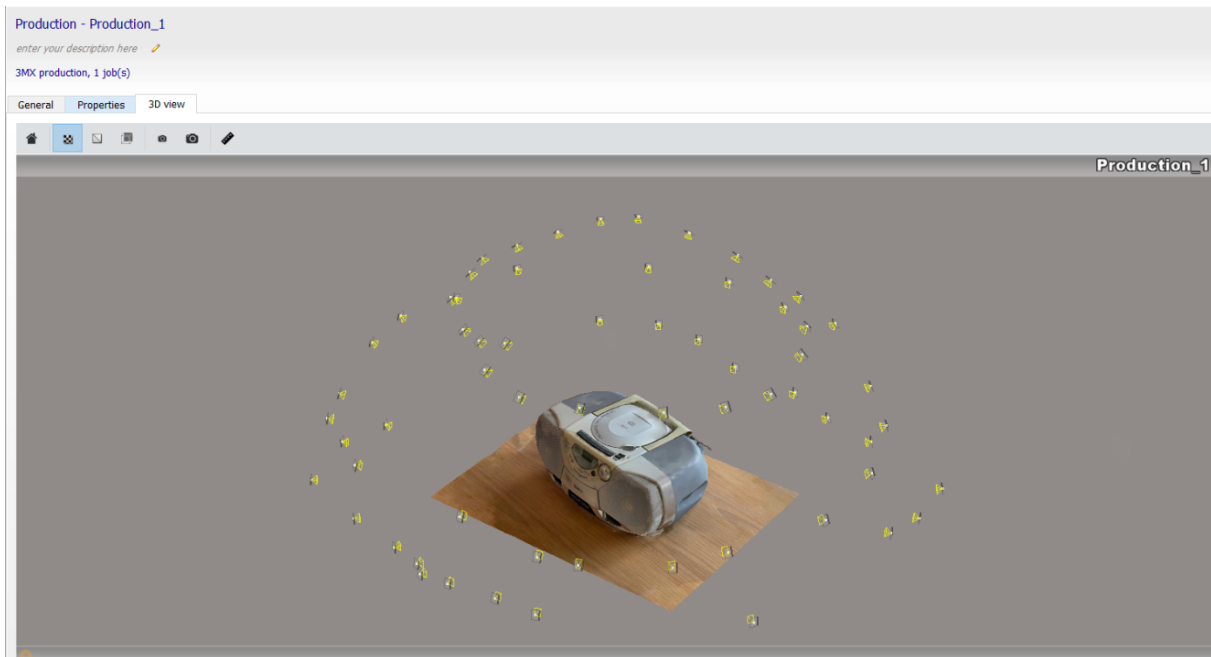


Slika 5.5 Ograničavanje područja izrade modela digitalnog dvojnika radio uređaja

Završnu fazu pokrećemo pritiskom na gumb „Submit new production“. Tada se otvara izbornik u kojem je potrebno popuniti sljedeća polja:

- „Name“,
- „Purpose“,
- „Format/Options“,
- „Destination“.

Ime dobivenog modela ispuni se po želji, a pod opcijom „Purpose“ automatski (by default) odabrana je „3D mesh“. Za završni format modela odabran je „ContextCapture 3MX“. Zadatak ponovno preuzima modul „ContextCapture Engine“ te vrši završno procesiranje. Tada započinje tehnički najzahtjevniji proces obrade. Ovisno o snazi računala, brzini procesora, broju jezgara te o kapacitetu grafičke kartice, stvaranje modela može potrajati od nekoliko minuta do nekoliko sati. Nakon izvršene obrade, rezultate je moguće predočiti klikom na gumb „3D view“ (Slika 5.6).



*Slika 5.6 Digitalni dvojniki radio uređaja*

Rezultate je također moguće prikazati u „Bentley-evom“ modulu „Acute 3D viewer“. Modul omogućava vršenje inspekcije nad dobivenim modelom. Upotrebom običnog mobilnog uređaja postignuti su više nego zadovoljavajući rezultati.

## 6. USPOSTAVA DIGITALNOG DVOJNIKA SILOSA

### 6.1 OBJEKT ISTRAŽIVANJA I KORIŠTEN INSTRUMENTARIJ

Cilj praktičnog dijela ovog istraživanja bio je izraditi digitalnog dvojnika nekog objekta na području grada Zagreba. Kao predmet istraživanja odabran je objekt silosa Resnik na području katastarske općine Resnik. Objekt se nalazi na katastarskoj čestici 3350/3. Prikaz odabranog objekta unutar platforme „Google Maps“ nalazi se na slici 6.1.



Slika 6.1 Prikaz silosa Resnik unutar „Google Maps 3D“ platforme

Kako bi se izradio digitalni dvojnik silosa, potrebno je bilo prikupiti podatke uz pomoć odgovarajućeg alata. Za izradu 3D modela visoke preciznosti, potrebno je prikupiti niz fotografija visoke rezolucije, koje će kasnije softver „ContextCapture“ spojiti u jedinstveni model.

Dron „DJI Phantom 4 Pro v2.0“ upotrijebljen je za prikupljanje podataka (Slika 6.2). Ovaj model proizvod je kineskog proizvođača „Da - Jiang Innovations“ (DJI). Koristeći 1-inčni „CMOS“ senzor koji omogućuje snimanje 4K/60FPS videozapisa i 20MP fotografija, „Phantom 4 Pro v2.0“ pruža potpunu slobodu tijekom snimanja. Sustav prijenosa „OcuSync 2.0 HD“ osigurava stabilnu povezanost i pouzdanost. Daljinski upravljač na krilima ovog sustava koristi tehnologiju multipleksiranja s vremenskom podjelom za slanje kontrolnih signala i primanje video signala istovremeno. To omogućuje 1080p „livestreaming“ na udaljenosti do deset kilometara. Mogućnost otkrivanja prepreka u pet smjerova poboljšava sigurnost i cjelokupno iskustvo. Namjenski daljinski upravljač s ugrađenim zaslonom osigurava još veću preciznost i kontrolu. Brojne inteligentne značajke čine letenje još lakšim. Za izradu konstrukcije drona upotrijebljeni su titanij i magnezij, čime je dron čvršći i lakši. Pripadajuća kamera ima optimiziranu širokokutnu leću f/2.8, koja osigurava žive, oštre i detaljne fotografije i videozapise, istovremeno čuvajući točnost boja. Pomoću mehaničkog zatvarača, uklanjaju se deformacije uzrokovane letenjem velikom brzinom ili snimanjem objekata u pokretu. Izbor nekoliko načina letenja čine snimanje s „Phantom 4 Pro v2.0“ dronom jednostavnijim i praktičnijim. Prebacivanje između načina letenja daje pilotima potrebnu kontrolu, bez obzira

na brzinu. Intuitivne kontrole i maksimalna brzina od 45 mph pojednostavljaju složene snimke. Dron ima ugrađen „flight autonomy” sustav. Radi se o naprednoj platformi za zračnu inteligenciju i automatizaciju leta, koja snimateljima pruža samopouzdanje za snimanje složenijih scena. Pregled okoline u stvarnom vremenu i 3D karta pružaju ključne podatke. Aplikacija „DJI GO 4” prikazuje vijek trajanja baterije te izračunava preostalo vrijeme leta. Kada se dosegne minimalna udaljenost potrebna za sigurno putovanje natrag do točke polijetanja, pilot će se upozoriti. Napredni sustav upravljanja baterijama također je postavljen za sprječavanje prekomjernog punjenja i prekomjernog pražnjenja. Kada se baterije stave u dugotrajno skladištenje, one će se isprazniti kako bi održale dobro zdravlje. Ako su baterije u potpunosti napunjene, najdulje vrijeme leta iznosi trideset minuta (URL 13).

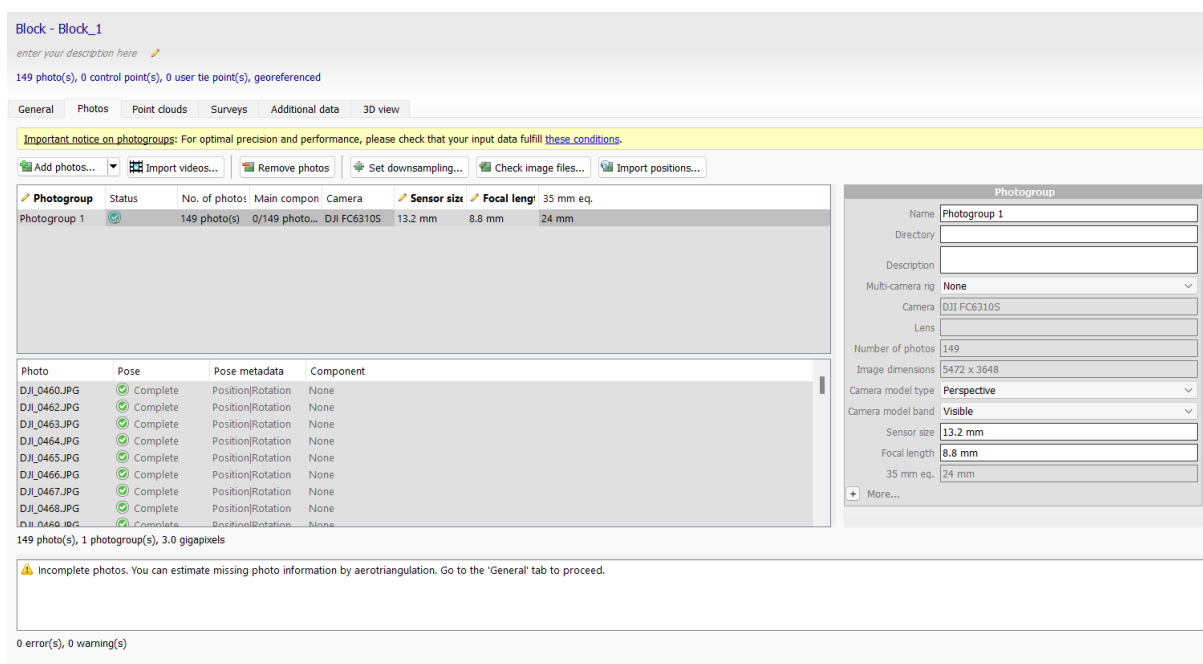


Slika 6.2 „DJI Phantom 4 Pro v2.0” (URL 13)

## 6.2 USPOSTAVA DIGITALNOG DVOJNIKA SILOSA

Snimanje je provedeno 2.6.2021. godine. Svi vremenski uvjeti bili su povoljni za podizanje bespilotne letjelice u zrak i obavljanje snimanja. Let je isplaniran na način da se prikupljanje fotografija obavi oblijetanjem drona oko silosa na 4 različite visine (Slika 6.4). Tijekom snimanja prikupljeno je ukupno 149 fotografija visoke rezolucije. Silos je sniman samo s vanjske strane, što znači da se sadržaj digitalnog dvojnika odnosi na oplošje silosa, bez elemenata njegove unutrašnjosti.

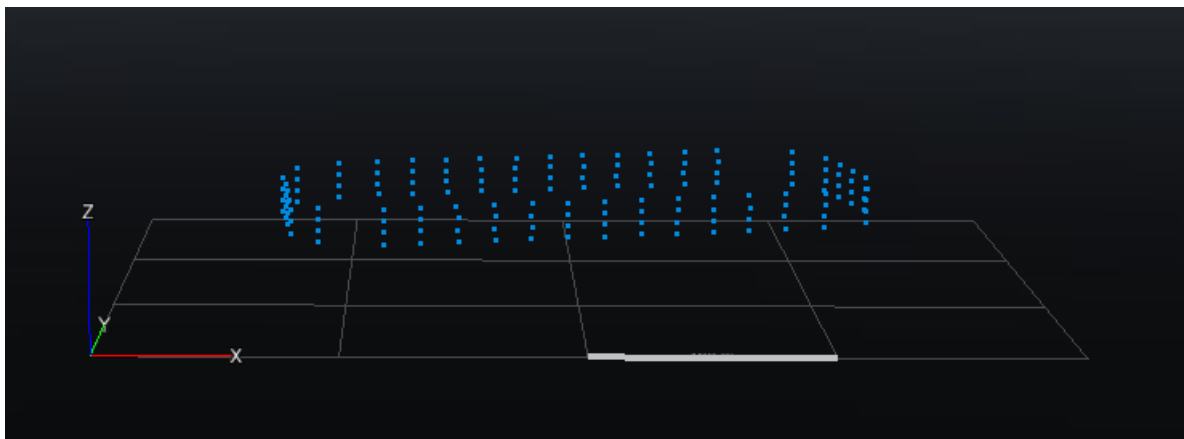
Pokretanjem modula „ContextCapture Master“ te kreiranjem novog projekta, kao i kod primjera izrade testnog primjerka, započinje uspostava dvojnika. Pomoću opcije „Add Photos“ učitano je svih 149 fotografija u softveru. Poželjno je da se sve fotografije nalaze unutar iste mape radi bolje preglednosti. Sve potrebne specifikacije kamere, koje su nužne za pravilnu uspostavu dvojnika, automatski su učitane tijekom ubacivanja fotografija u program. Softver je podatke automatski preuzeo iz EXIF podataka pojedine snimke. Veličina senzora, žarišna udaljenost i pozicija fotografija najvažnije su komponente kamere. Ako jedan od tih podataka za neku snimku nedostaje, ta snimka se neće moći iskoristiti za aerotriangulaciju. Ako je neka snimka nepotpuna s podacima, tada će se u donjem lijevom kutu pojaviti upozorenje (Slika 6.3). Da je svaka snimka potpuna može se uvjeriti ako se pogleda stupac „Pose“. Kada se unutar tog stupca nalazi zelena kvačica i riječ „Complete“, znači da je snimka valjana. Unutar prozora na desnoj strani mogu se vidjeti specifikacije kamere korištene pri snimanju.



Slika 6.3 Učitavanje snimki u „ContextCapture Master“ modul

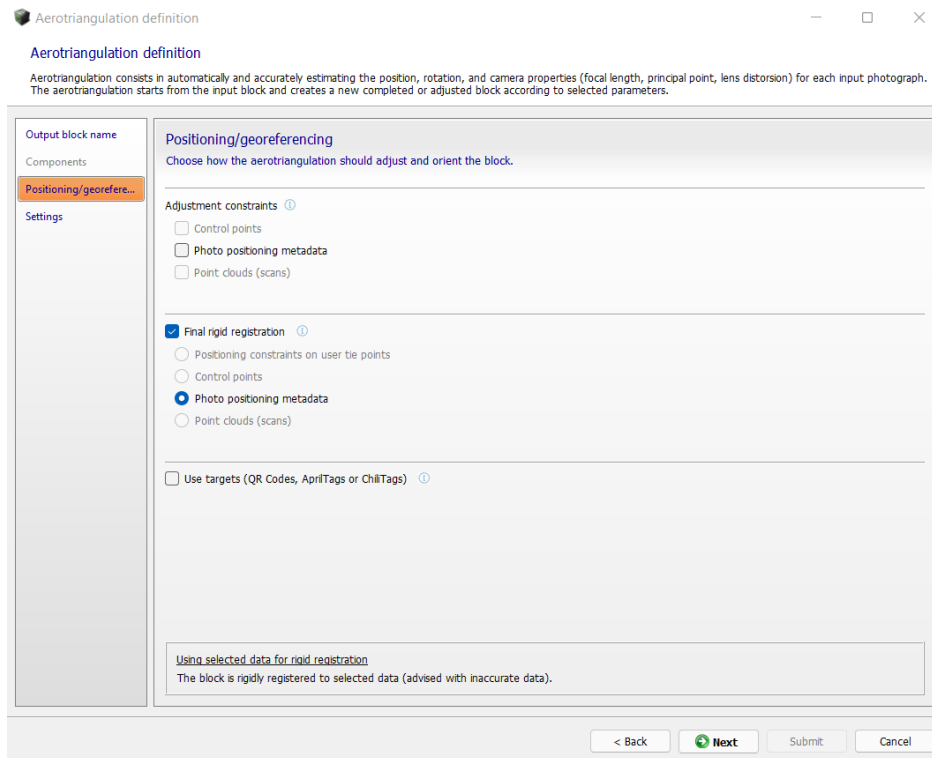
Kao što je već rečeno, softver sadrži mnoštvo prostornih referentnih sustava. Učitane fotografije imale su podatke o poziciji u WGS84 koordinatnom sustavu, dakle georeferencirane su. Na temelju toga može se zaključiti da će model biti ispravno orijentiran i skaliran.

Pritiskom na opciju „3D view“, može se vidjeti pozicija s koje je pojedina fotografija snimljena, odnosno njene koordinate (Slika 6.4). Svaka plava točka označava poziciju s koje je pojedina scena snimljena. Ukoliko kliknemo na neku točku, prikazat će nam se fotografija koja je snimljena s te pozicije. Vidljivo je da je plan leta drona izrađen na taj način da se objekt snimi kružno, sa svake strane, s 4 visine.



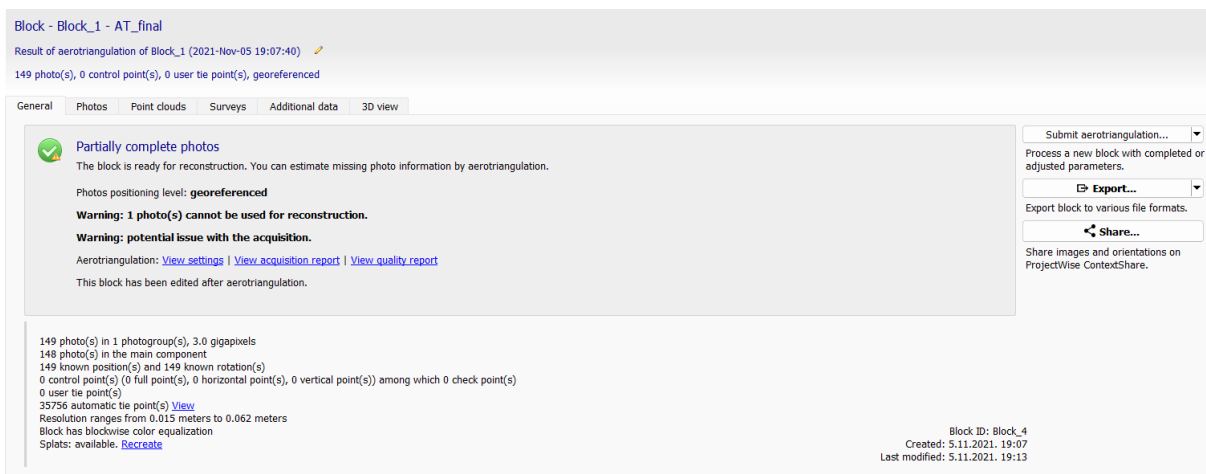
*Slika 6.4 Prikaz pozicija drona u trenutku prikupljanja pojedine snimke*

Sljedeći korak je aerotriangulacija. Prije njenog provođenja, uključuje se modul „ContextCapture Engine“ koji vrši detaljnu analizu svake snimke pojedinačno. Modul analizira svaku od 149 snimki te traži specifične zajedničke elemente koji se preklapaju. Svaki specifičan element mora biti vidljiv na barem 3 snimke kako bi se smjestio u prostor. Kao što je već spomenuto, kvaliteta samih snimki presudna je za dobivanje kvalitetnog rezultata. Naravno, što više slika to bolje. Ozbiljni projekti u kojima se koristi digitalni dvojniki dobiveni na ovaj način, sastoje se od tisuće snimaka. Za pokretanje aerotriangulacije stisnemo gumb „Submit aerotriangulation“, nakon čega se pojavljuje izbornik (Slika 6.5). Nakon otvaranja postavki i određivanja lokacije spremanja rezultata, u izborniku „Positioning/georeferencing“ kod opcije „Final grid registration“ odabere se „Photo positioning metadata“. To znači da će se pozicioniranje elemenata vršiti pomoću metapodataka snimaka. Pod opcijom „Settings“ ostavlja se sve po izvornoj postavci.



Slika 6.5 Postavke za provođenje aerotriangulacije

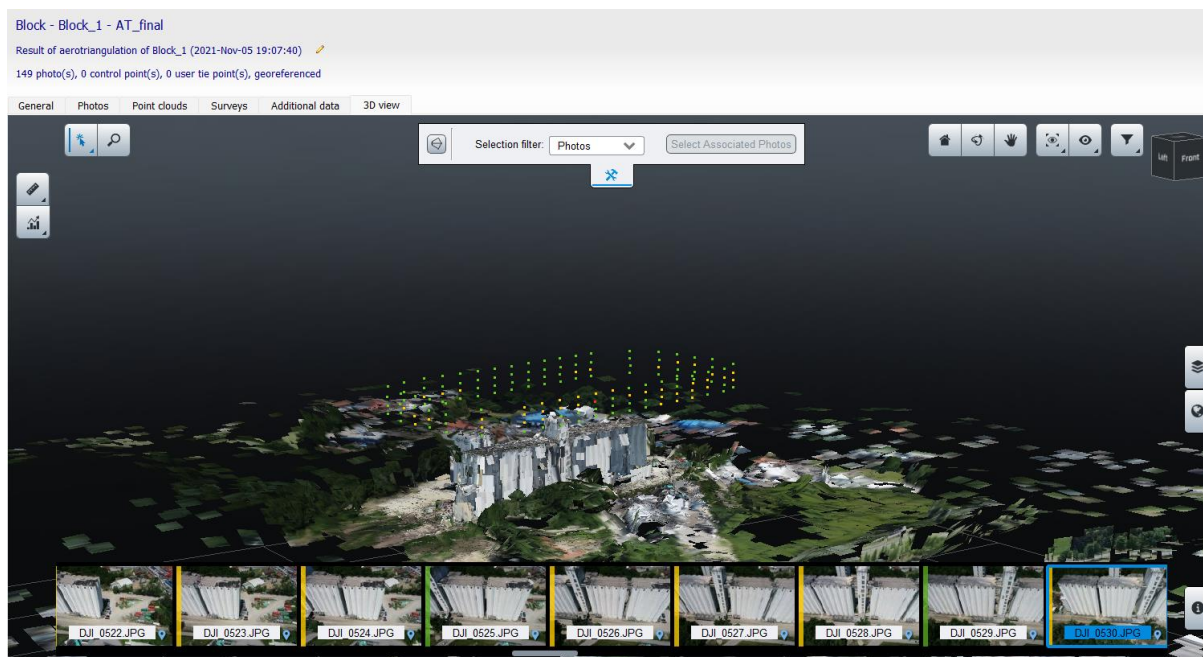
Sve je spremno za pokretanje aerotriangulacije. „ContextCapture Engine" tada izvodi zahtjevne algoritme. Ako se radi o nekom ogromnom prostornom objektu, proces može potrajati satima te je potrebno jako računalo. Snimana scena u ovom projektu nije tolikih razmjera pa proces traje desetak minuta. Nakon izvršene aerotriangulacije pojavljuje se izvješće (Slika 6.6).



Slika 6.6 Izvješće provedene aerotriangulacije

Analiziranjem izvješća, može se vidjeti da je svih 149 snimki procesirano. Jedna snimka pokazala se ne dovoljno kvalitetna kako bi se uzela u obzir te je naknadno izbrisana. Softver

pronašao ukupno 33756 veznih točaka pomoću kojih je sklopio mozaik. Pritiskom na opciju „3D view“ prikazuje se sklopljeni mozaik snimaka (Slika 6.7).



*Slika 6.7 Rezultati provedene aerotriangulacije*

U svrhu boljeg uvida u rezultate aerotriangulacije nad opažanim objektom, na sljedećoj slici cjelokupna scena je uvećana (Slika 6.8)

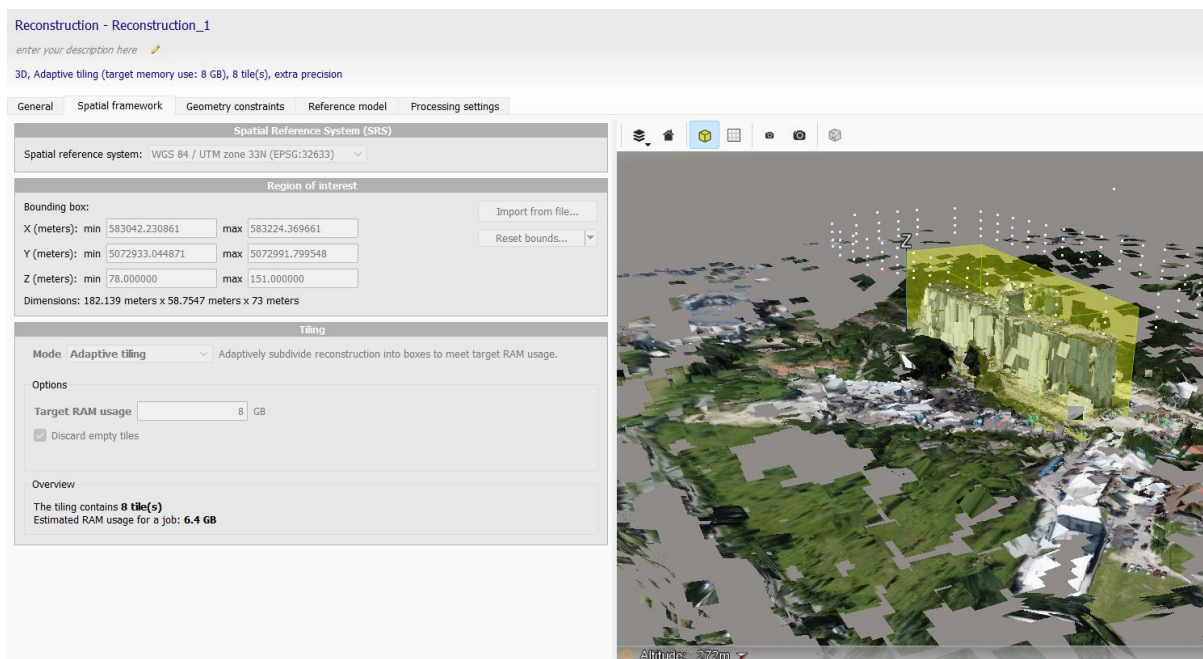


*Slika 6.8 Rezultati provedene aerotriangulacije – naglasak na silos*

Žuti i zeleni pravokutnici predstavljaju pozicije s kojih su scene snimljene. Boja svake vezne točke odgovara boji toga elementa objekta u stvarnosti. Konačan izgled modela silosa nazire se po formaciji veznih točaka.

Sljedeći korak je provođenje rekonstrukcije modela i njegova konačna produkcija. Rekonstrukcija upravlja prostornim referentnim sustavom. Nakon njenog provođenja pritiskom na gumb „New reconstruction“, poželjno je ograničiti područje interesa, odnosno područje za

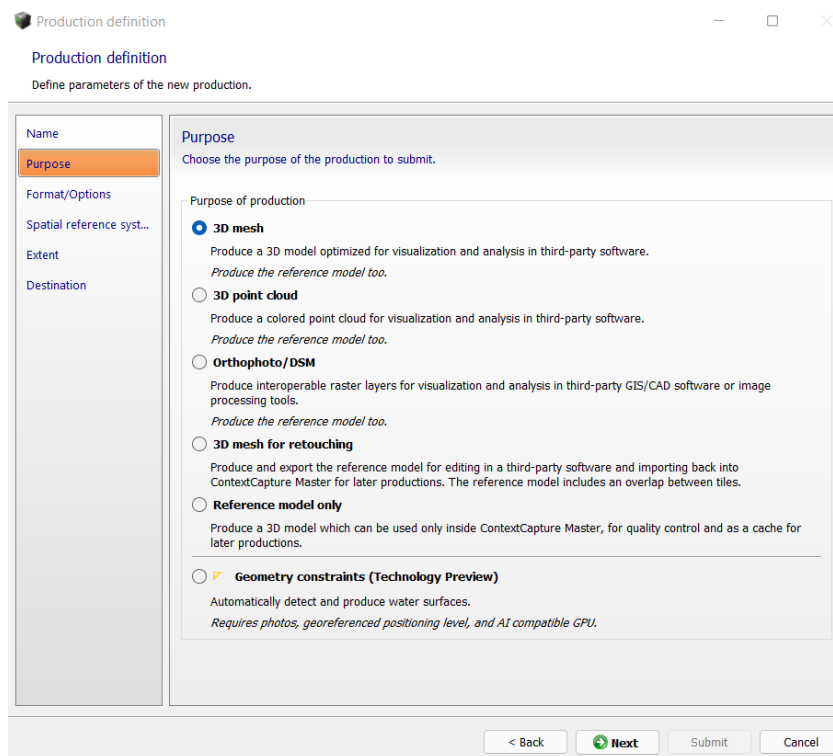
koje se želi izraditi konačni model. U izborniku se pritisne gumb „Spatial framework” te se otvori prikaz sličan kao kod rezultata provedene aerotriangulacije. U tom izborniku, iznad prizora scene, nalazi se žuta kockica, odnosno opcija „Edit region”, koja se uključi kako bi se moglo manipulirati ograničavanjem područja. Na sceni se tada pojavljuje žuto tijelo u obliku kvadra. Kao što je već rečeno, njega se može horizontalno i vertikalno pomicati po pet ploha (Slika 6.9).



Slika 6.9 Ograničavanje područja izrade digitalnog dvojnika

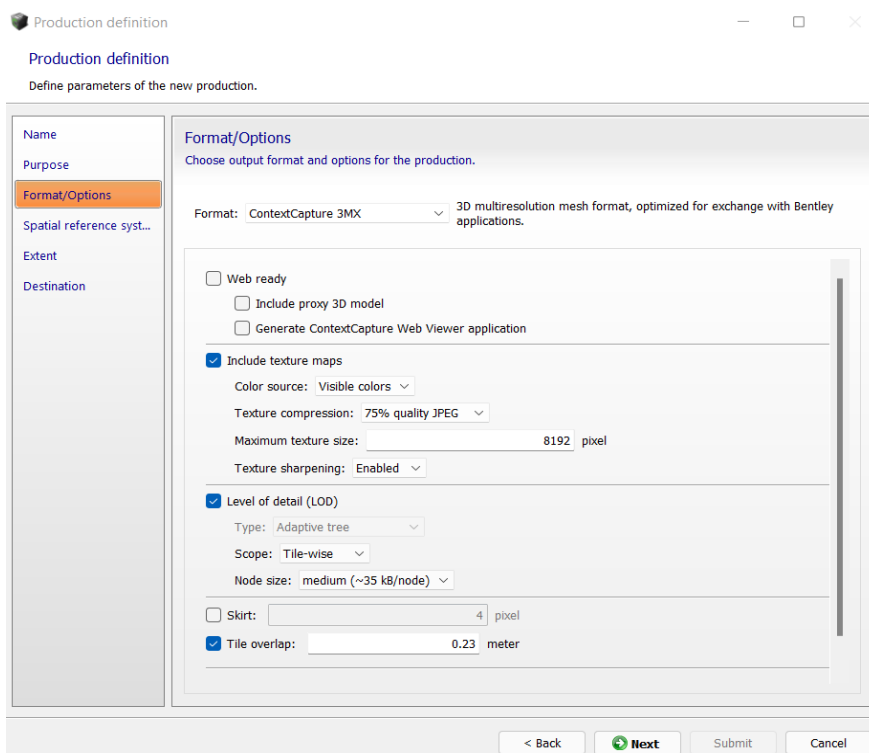
Kao što se može vidjeti na slici 6.9, područje se ograničilo na taj način da samo bliska okolina silosa prođe kroz završnu obradu. Na taj način izbačen je neželjeni, odnosno nepotrebnii sadržaj. Time se količina podataka koju „ContextCapture Engine” mora obraditi značajno smanjila, kao i vrijeme procesiranja. Bijele točke predstavljaju pozicije kamere. Nadalje, iako je opseg obrade podataka značajno smanjen, količina podataka je i dalje velika za korišteno računalo stoga ne može procesirati cijelu scenu odjednom. Ukupna količina podataka iznosi 51,2 gigabajta. RAM korištenog računala je 8 gigabajta. To je ujedno količina podataka koju računalo može obraditi odjednom. Problem se rješava na način da se scena podijeli na više dijelova. U opciji „Tiling” (Slika 6.9) scena je podijeljena na 8 dijelova, a svaki dio zauzima 6,4 gigabajta što je manje od RAM-a računala. U opciji „Mode” odabran je „Adaptive tiling” koji automatski dijeli scenu na više dijelova, ciljajući da količina podataka bude manja od RAM-a računala. Tada se u glavnom izborniku može pokrenuti završni korak pritiskom na gumb „Submit new production”.

Zatim se pojavljuje izbornik u kojem vršimo završna podešavanja. Unutar izbornika „Purpose” odabere se „3D Mesh” (Slika 6.10).



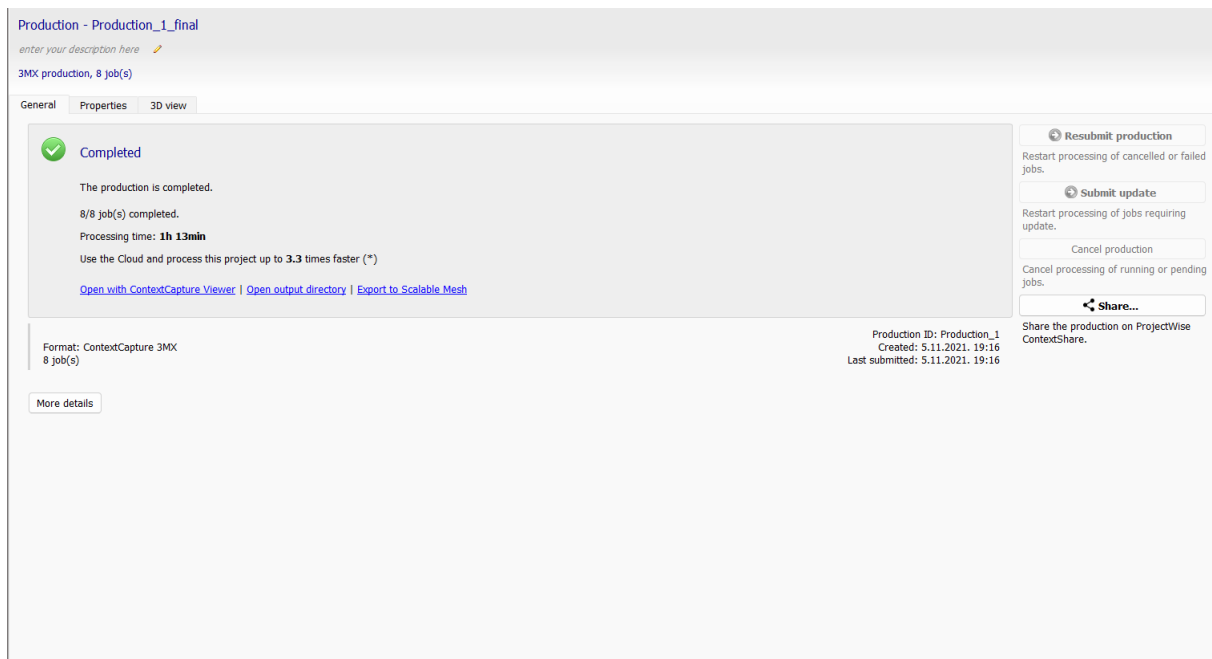
Slika 6.10 Odabir strukture modela

Pod opcijom „Format/options” unutar rubrike „Format” odabere se „ContextCapture 3MX” (Slika 6.11). Sve ostalo ostavlja se po izvornom postavu.



Slika 6.11 Odabir formata modela

Kao što je već rečeno, zavisno o brzini procesora, broju jezgara, snazi računala i kapacitetu grafičke kartice, dobivanje konačnog rezultata može potrajati relativno kratko ili satima. Nakon završetka obrade podataka, pojavljuje se tehničko izvješće (Slika 6.12).

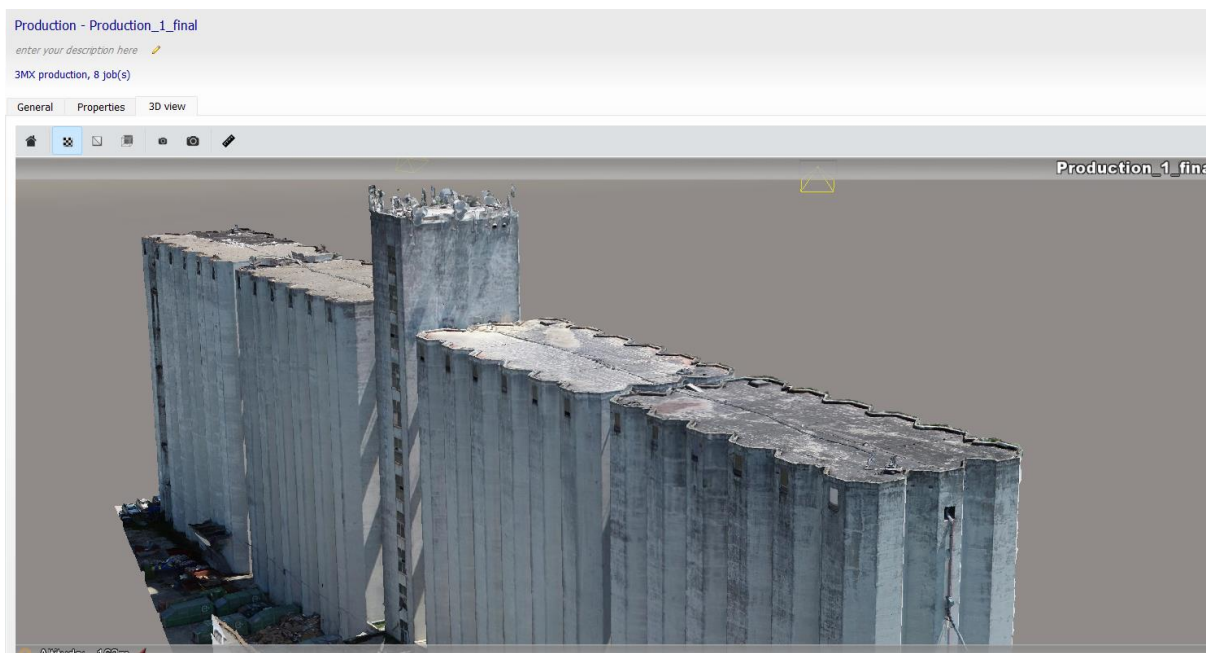


Slika 6.12 Izvješće završne obrade podataka

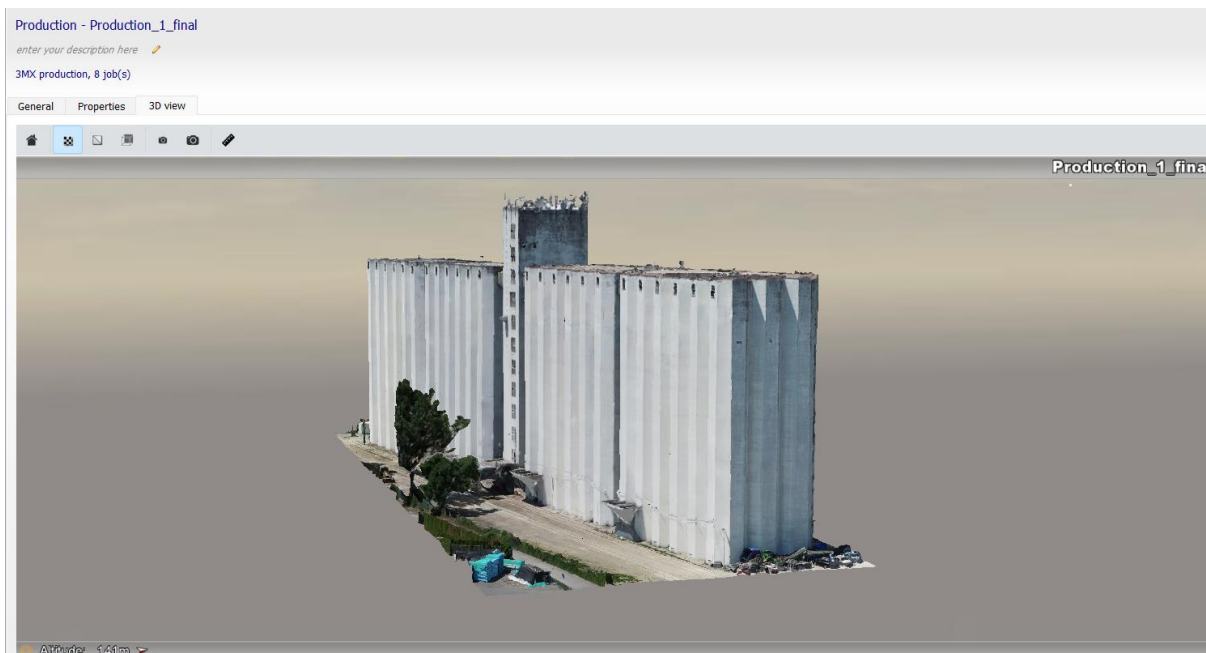
Gledajući izvješće zaključuje se da se kreiranje digitalnog dvojnika silosa uspješno privelo kraju. Svih 8 dijelova procesiranja uspješno je izvršeno. Jedan sat i trinaest minuta trajala je završna obrada podataka. Ako se uključi opcija „3D view“, može se vidjeti dobiveni rezultat (Slika 6.13, Slika 6.14, Slika 6.15, Slika 6.16, Slika 6.17, Slika 6.18).



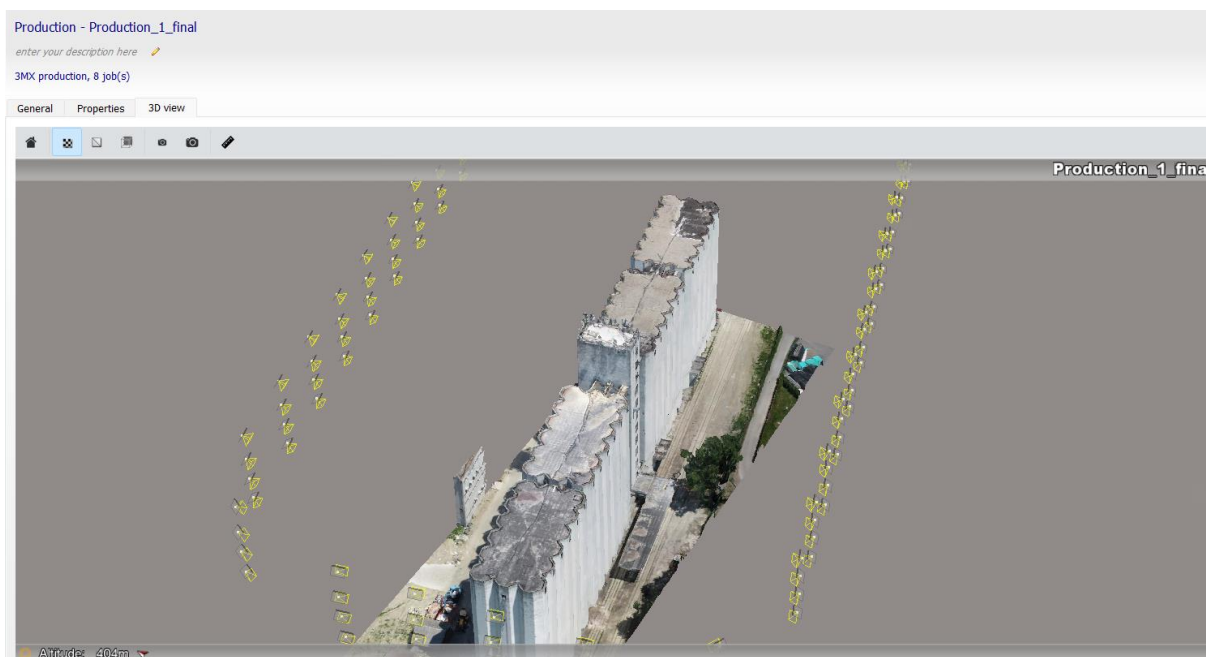
Slika 6.13 Digitalni dvojnik silosa



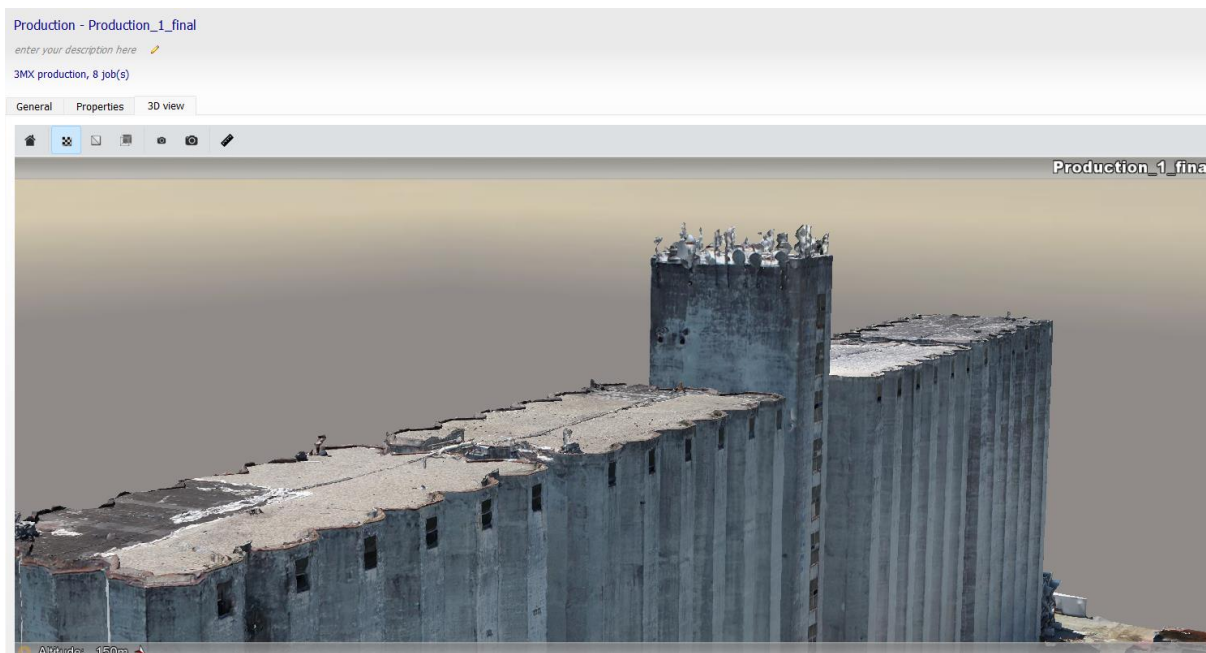
Slika 6.14 Digitalni dvojnik silosa



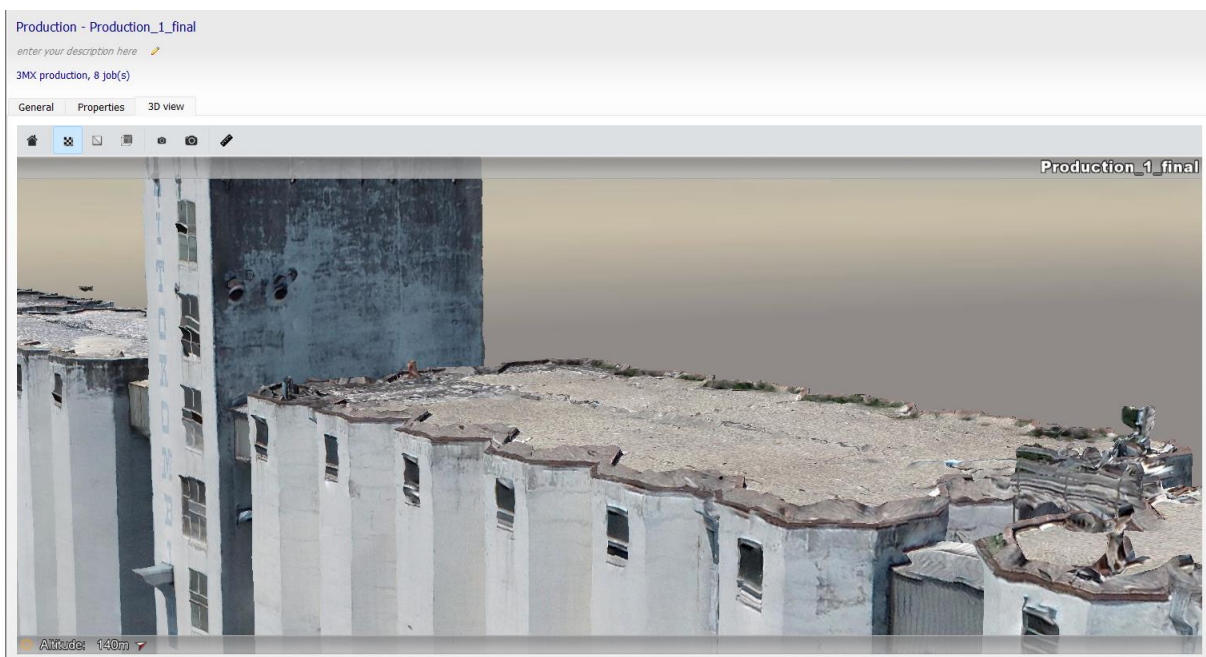
Slika 6.15 Digitalni dvojnik silosa



Slika 6.16 Digitalni dvojnik silosa



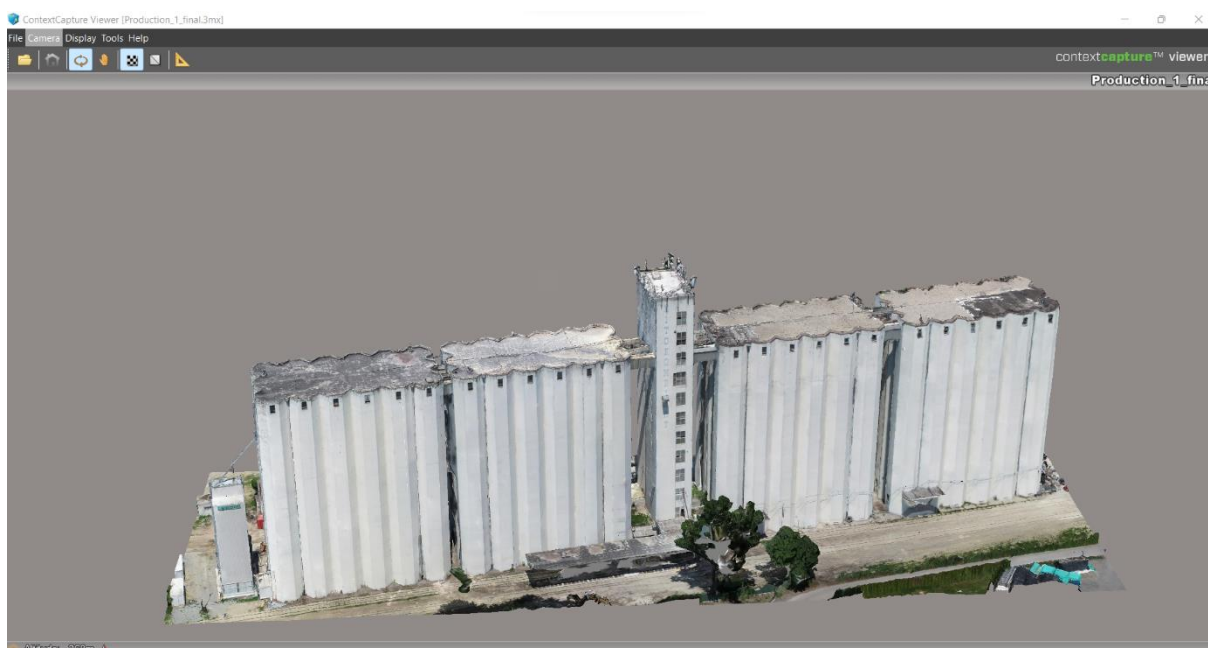
Slika 6.17 Digitalni dvojniki silosa



Slika 6.18 Digitalni dvojniki silosa

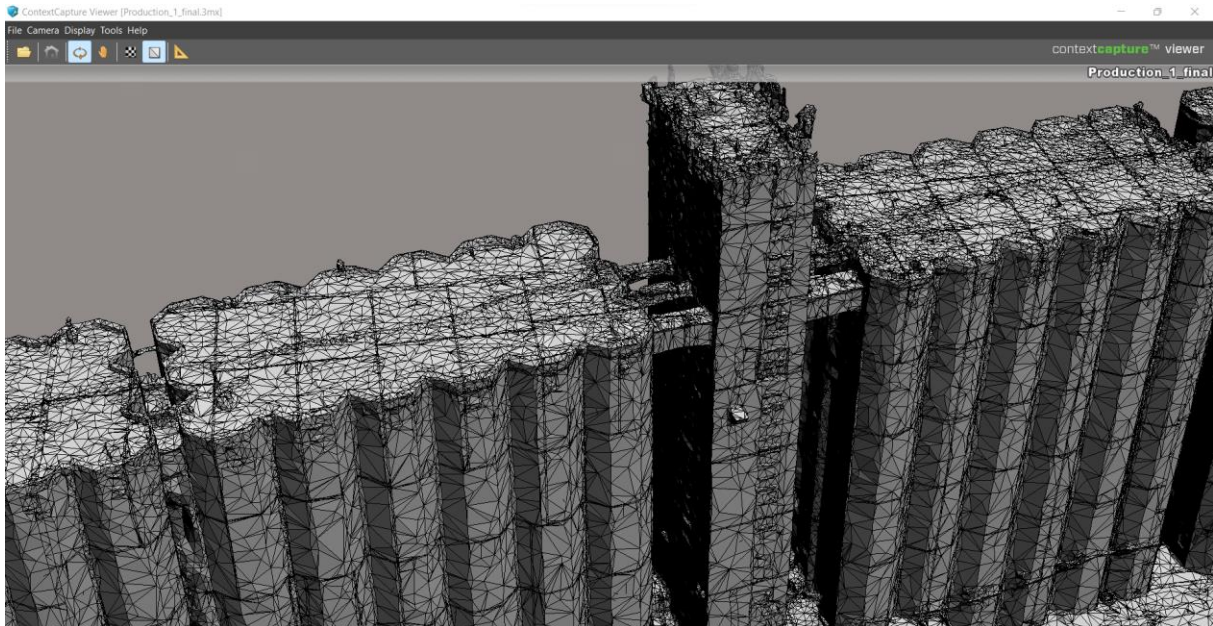
### 6.3 INTERPRETACIJA DOBIVENIH REZULTATA

Cijeli proces uspostave digitalnog dvojnika silosa odvio se bez problema. Za potrebe izrade praktičnog dijela istraživanja prikupljeno je 149 snimki visoke rezolucije. Kvaliteta snimki iznimno je važna te o njoj ovisi konačan rezultat. Što je snimki više te što je njihova kvaliteta na višem nivou, to će digitalni dvojnici biti precizniji i pouzdaniji, odnosno veće točnosti. Za potrebe uspostave dvojnika snimljen je samo plašt objekta, bez unutarnjeg sadržaja. Cijeli proces obrade podataka unutar softvera „ContextCapture“, od učitavanja snimki pa sve do rekonstrukcije završnog modela, protekao je bez ikakvih poteškoća. Promatrajući konačno rješenje, digitalni dvojnici plašta silosa Resnik, može se zaključiti da su rezultati zadovoljavajući. Dobiveni model može se otvoriti u modulu „ContextCapture viewer“ (Slika 6.14). Vidljivo je da su na sceni ostali neki nebitni detalji, kao što je drveće ili dijelovi nekih drugih manjih objekata. Njih se moglo izbaciti dodatnim smanjenjem područja obrade, ali pritom bi se zahvatio i plašt pa takve mjere nisu poduzete.



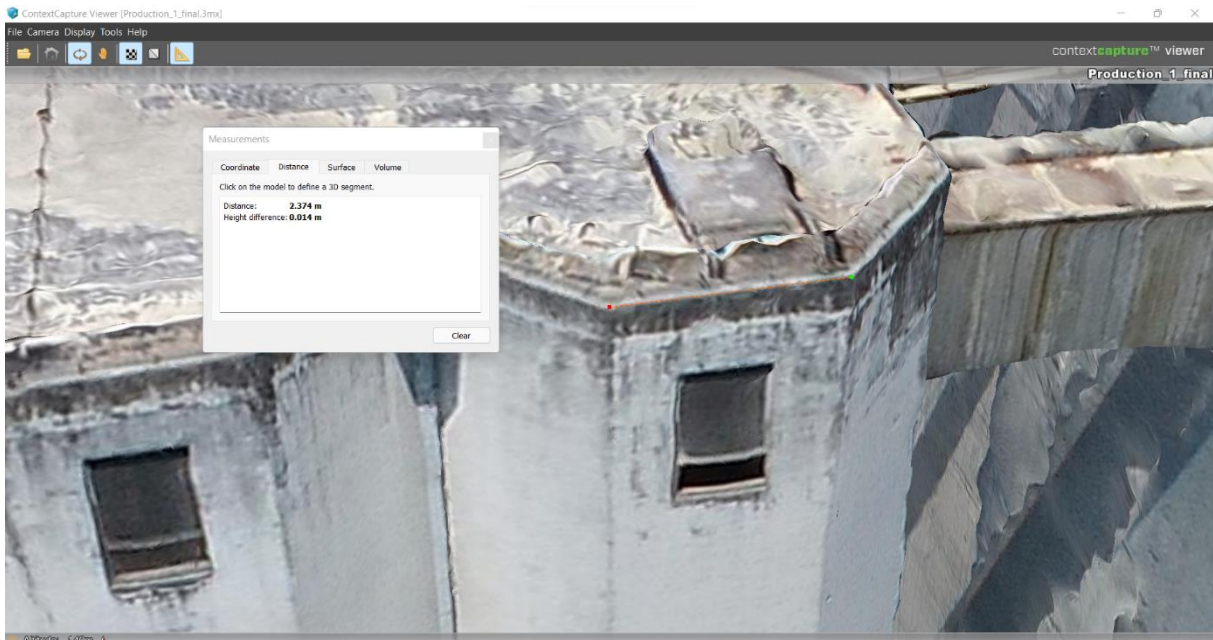
*Slika 6.19 Digitalni dvojnici silosa unutar modula „ContextCapture viewer“*

Pritiskom na gumb „Texture“ u gornjem lijevom kutu uklanja se tekstura objekta, a pritiskom na gumb „Wireframe“ pojavljuju se geometrijske veze. Tada se može vidjeti način na koji je softver formirao oplošje (Slika 6.15). Definiranjem veznih točaka te njihovim analitičkim povezivanjem softver je sklopio oplošje objekta podložno geometrijskim analizama.



*Slika 6.20 Struktura oplošja digitalnog dvojnika silosa*

Unutar ovog modula moguće je vršiti određene manipulacije nad objektom. Moguće je mjeriti dužinu, površinu, volumen te odrediti koordinate neke specifične točke na objektu, unutar postavljenog koordinatnog sustava. Primjer računanja dužine na objektu nalazi se na sljedećoj slici (Slika 6.16). Jednostavnim označavanjem dvije točke na objektu moguće je mjeriti dimenzije, odnosno vršiti inspekciju.



*Slika 6.21 Primjer upotrebe digitalnog dvojnika za analizu konstrukcije objekta*

Koliko koristan digitalan dvojn timer može biti pokazalo se kod primjera inspekcije mosta. Takav primjer može se usporediti s rezultatom ovog istraživanja. Kod oba primjera digitalni dvojn timer

opažanog objekta dobiven je snimanjem pomoću drona, odnosno prikupljanjem snimaka visoke rezolucije koje su potom spajane u mozaik. Oba modela mogu se iskoristiti za provođenje inspekcije nad njima. Pri tome većina stručnjaka ne treba izaći na teren, već analizu mogu provesti iz ureda. Tada više stručnjaka iz različitih područja može sudjelovati u interpretaciji, istovremeno. Uz to korištenje metodologije izrade digitalnog dvojnika znatno povećava i sigurnost. Na primjer, ukoliko se želi obaviti inspekcija nad objektom kako bi se utvrdilo da li je na objektu došlo do pojave pukotina ili nekakvih drugih vrsta oštećenja, dron u potpunosti zamjenjuje ljude pri izvođenju toga zadatka što znači da nisu potrebne opasne intervencije s njihove strane. Pri izvođenju opsežnih projekata, dron prikuplja na tisuće snimaka iz različitih položaja u odnosu na objekt. Tada se kao rezultat dobije iznimno precizan te pouzdan digitalni dvojnik. Oštećenja se mogu tada mjeriti na razini milimetra. Primjenom ove metode također bi se uštedjela određena financijska sredstva koja tada mogu biti utrošena tamo gdje su potrebna, kao na primjer na sanaciju objekta. Također, svi ti podaci bili bi dostupni stručnjacima u stvarnom vremenu, a oni ne bi gubili dragocjeno vrijeme na putovanja od ureda do terena i nazad.

## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog istraživanja bio je upoznati se s pojmom "Digitalni dvojnik", istražiti pripadajuće tehnologije, proučiti gdje se sve digitalni dvojnici u današnje vrijeme koriste te izraditi primjerak unutar softvera „ContextCapture“. Digitalni dvojnici zasigurno spadaju među tehnologije koje će transformirati današnje društvo. Potencijal koji oni nude je ogroman jer omogućuju provođenje testiranja nad digitalnim replikama čime se dolazi do spoznaje kako bi takve promjene utjecale na fizički entitet u stvarnosti. Kontinuiranim praćenjem nekog entiteta, odnosno analizom podataka prikupljenih u stvarnom vremenu, moguće je produljenje njegovog životnog vijeka te se defektne promjene mogu uočiti na vrijeme. Sve to vodi ka konstantnoj optimizaciji entiteta te unaprjeđenju budućih, na temelju spoznaja dobivenih putem opažanja onih prethodnih. Izrada digitalnih dvojnika kompleksan je zadatak te još uvijek ne postoji standardizirana platforma. To predstavlja samo jedan od izazova s kojim se digitalni dvojnici suočavaju. Sve izazove treba detaljno analizirati te pronaći adekvatna rješenja kako bi ova tehnologija dosegla puni potencijal. Prirodne znanosti, postrojenja za proizvodnju, energetski sektor, pomorska industrija te geoprostorna industrija neka su od područja primjene digitalnih dvojnika. Potencijal ove tehnologije u geoprostornoj industriji je izuzetan te tek treba zaživjeti. Praćenjem stanja objekata u stvarnom vremenu pomoću različitih senzora u konačnosti rezultira uštedom značajnih sredstava koja tada mogu biti preusmjerena u najpotrebnije svrhe. Utjecaj digitalnih dvojnika sve će više rasti te će se sve više tvrtki odlučivati za njihovu upotrebu.

Softver „ContextCapture“ se prije svega pokazao jednostavnim za korištenje. Kvaliteta dobivenih rezultata ovisi o kvaliteti prikupljenih podataka. Kada su podaci prikupljeni sukladno nivou kvalitete kakav projekt zahtjeva, softver će ih pouzdano procesirati te u konačnosti polučiti izvrsne rezultate.

Izrada praktičnog dijela ovog istraživanja protekla je uspješno. U fazi prikupljanja podataka pomoću bespilotne letjelice izazov je bio odrediti razinu detalja kojom bi silos trebao biti snimljen kako bi konačno rješenje imalo nekakvu uporabnu svrhu. Dobiveni rezultati su zadovoljavajući te se može reći da je u okviru ovog rada digitalni dvojnik uspješno uspostavljen. Iskorak u odnosu na ovaj rad bio bi izraditi digitalnog dvojnika nekog objekta s još većom razinom detalja, odnosno snimanjem unutrašnjeg i vanjskog dijela te povećanjem broja pozicija s kojih je taj objekt snimljen. Svemu tome mogla bi se dodati i vremenska dimenzija, što znači opažanje objekta kroz vrijeme kako bi se pratile promjene u stvarnom vremenu.

**LITERATURA:**

Anonymus: The Digital Twin Concept explained. (12.2.2019.),

URL:<https://safety4sea.com/cm-the-digital-twin-concept-explained/#:~:text=A%20digital%20twin%20is%20a,time%20with%20the%20physical%20entity.> (26.1.2022.)

Anonymus: Digital Twins vs. Building Information Modeling (BIM). (24.6.2020.),

URL:<https://www.iotforall.com/digital-twin-vs-bim>.(26.1.2022.)

Anonymus: Scientists begin building highly accurate digital twin of our planet. (25.2.2021.),

URL:[https://www.spacedaily.com/reports/Scientists\\_begin\\_building\\_highly\\_accurate\\_digital\\_twin\\_of\\_our\\_planet\\_999.html](https://www.spacedaily.com/reports/Scientists_begin_building_highly_accurate_digital_twin_of_our_planet_999.html).(26.2.2022.)

Campos-Ferreira, A.E., Lozoya-Santos, J.J., Vargas-Martinez, A., Mendoza, R.R., Morales-Menendez, R.: Digital Twin Applications: A review. (23.10.2019.),

URL:<http://www.amca.mx/RevistaDigital/cnca2019/files/0111.pdf>.(26.1.2022.)

DNV GL: Digital twins for Blue Denmark. (2018.), (10.3.2021.)

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C.: Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and open Research. (7.5.2020.),

URL:<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9103025>.(10.3.2021.)

Khajavi, S.H., Motlagh, N.H., Jaribion, A., Werner, L.C., Holmstrom, J.: Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. (7.10.2019.),

URL:<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8863491>. (26.1.2022.)

Klein, P., Walsh, S.: The digital mine, What does it mean for you? (2017.),

URL:<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/au/Documents/energy-resources/deloitte-au-er-digital-mine-030817.pdf>. (10.3.2021.)

Marr, B.: How are Digital Twins Used In Practice: 5 Real-World Examples Beyond Manufacturing. (28.8.2020.),

URL:<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/08/28/how-are-digital-twins-used-in-practice-5-real-world-examples-beyond-manufacturing/>. (10.3.2021.)

Miskins, C.: The history and creation of the digital twin concept. (ožujak 2019.),

URL:<https://www.challenge.org/insights/digital-twin-history/>. (10.3.2021.)

Panetta, K.: Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018. (3.10.2017.),

URL:<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>. (10.3.2021.)

Parrott, A., Warshaw, L.: Industry 4.0 and the digital twin. (2017.),

URL:[https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26\\_201706/kr\\_insights\\_deloitte-newsletter-26\\_report\\_02\\_en.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26_201706/kr_insights_deloitte-newsletter-26_report_02_en.pdf). (10.3.2021.)

Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., Zhao, D.: Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. (2018.),  
URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118302580>.(10.3.2021.)

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A.Y.C.: Enabling technologies and tools for digital twin. (2019.),

URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S027861251930086X>.  
(10.3.2021.)

Robins, B.: Advancing BIM: Digital Twins. (2019.),

URL:<https://www.bentley.com/en/perspectives-and-viewpoints/topics/perspectives/2019/advancing-bim-digital-twins>. (10.3.2021.)

Shaw, K., Fruhlinger, J.: What is a digital twin and why it's important to IoT. (31.1.2019.),

URL:<https://www.networkworld.com/article/3280225/what-is-digital-twin-technology-and-why-it-matters.html>. (10.3.2021.)

POPIS URL-ova

Ferguson S. Apollo 13: The First Digital Twin. 14.4.2020. URL 1: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>.(26.1.2022.)

Daskalova M. The 'digital twin' – a bridge between the physical and the digital world. 5.7.2018.  
URL 2: <https://cobuilder.com/en/the-digital-twin-a-bridge-between-the-physical-and-the-digital-world/>. (26.1.2022.)

TWI. SIMULATION VS DIGITAL TWIN (WHAT IS THE DIFFERENCE BETWEEN THEM?). URL 3: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/simulation-vs-digital-twin#KeyDifferences>.(26.1.2022.)

MARKETSANDMARKETS. Digital twin market. URL 4: <https://www.marketsandmarkets.com/pdfdownloadNew.asp?id=225269522>.(15.2.2022.)

European Commission. Shaping Europe's digital future. URL 5: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>.(26.1.2022.)

European Commission. Shaping Europe's digital future: Destination Earth. URL 6: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/destination-earth>.(26.1.2022.)

Phillips. How a virtual heart could save your virtual one. 12.11.2018. URL 7: <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20181112-how-a-virtual-heart-could-save-your-real-one.html>. (26.1.2022.)

TOMORROW.CITY. SINGAPORE EXPERIMENTS WITH ITS DIGITAL TWIN TO IMPROVE CITY LIFE. 20.5.2019. URL 8: <https://tomorrow.city/a/singapore-experiments-with-its-digital-twin-to-improve-city-life/>.(26.1.2022.)

SpatialSource. Spatial Digital Twin helps track mouse plague. 13.8.2021. URL 9: [https://www.spatialsource.com.au/spatial-digital-twin-helps-track-mouse-plague/?utm\\_medium=email&utm\\_campaign=SS%20Newsletter%2018082021&utm\\_content](https://www.spatialsource.com.au/spatial-digital-twin-helps-track-mouse-plague/?utm_medium=email&utm_campaign=SS%20Newsletter%2018082021&utm_content)

[=SS%20Newsletter%2018082021%20Version%20B%20CID\\_1ad20822820c21ab853d92312e33a152&utm\\_source=Campaign%20Monitor&utm\\_term=Spatial%20Digital%20Twin%20helps%20track%20mouse%20plague.](https://www.intellectsoft.net/blog/advanced-imaging-algorithms-for-digital-twin-reconstruction/)(26.1.2022.)

Intellectsoft. Advancing Imaging Algorithms in Digital Twin Reconstruction of Construction Sites. 17.1.2018. URL 10: <https://www.intellectsoft.net/blog/advanced-imaging-algorithms-for-digital-twin-reconstruction/>.(26.1.2022.)

BIM Community. Microsoft showcases Bentley's ContextCapture during IGNITE 2021. 23.3.2021. URL 11: <https://www.bimcommunity.com/news/load/1346/microsoft-showcases-bentley-s-contextcapture-during-ignite-2021>.(26.1.2022.)

Bentley. ContextCapture CONNECT Edition. 2017. URL 12: <https://www.bentley.com/-/media/3dca09466818457fb9b7c72ada8e8e97.pdf>.(26.1.2022.)

DJI. PHANTOM 4 PRO V2.0. URL 13: <https://www.dji.com/hr/phantom-4-pro-v2?site=brandsite&from=nav>.(26.1.2022.)

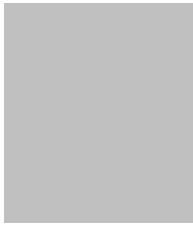
## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Koncept ideje o integraciji fizičkog i digitalnog svijeta (Miskins, 2016).....	3
Slika 2.2 Fizička replika sustava letjelice „Apollo 13" (URL 1) .....	4
Slika 2.3 Usporedba digitalnog dvojnika i BIM-a (Khajavi i dr., 2019).....	8
Slika 2.4 Razlike između digitalnog dvojnika i BIM-a (URL 2).....	8
Slika 3.1 Područja objava znanstvenih članaka na temu digitalnih dvojnika (Campos-Ferreira i dr., 2019) .....	10
Slika 3.2 Struktura „Destination Earth" platforme (URL5).....	11
Slika 3.3 Struktura „DestinE Data Lake" platforme (URL5).....	12
Slika 3.4 Digitalni dvojnik lanca proizvodnje (Parrott i dr., 2017).....	14
Slika 3.5 Način na koji „Heart Model" izrađuje personalizirani model srca (URL 6).....	16
Slika 3.6 „HeartNavigator" platforma (URL 6) .....	17
Slika 3.7 Digitalni dvojnik plovila kroz njegov životni ciklus (DNV GL, 2018).....	18
Slika 3.8 Scena „Virtual Singapore" platforme (URL 7).....	20
Slika 3.9 Prikaz opsega mišje pošasti na prostornom digitalnom dvojniku Australije (URL8) .....	21
Slika 3.10 Prikaz ključnih čimbenika operativnog procesa digitalnog rudnika (Klein i dr., 2017) .....	23
Slika 3.11 Digitalni dvojnik mosta u Minneapolisu u softveru „ContextCapture" (URL 10) .	24
Slika 3.12 Vizualizacija mosta u uredu pomoću „HoloLens2" uređaja (URL 10) .....	25
Slika 4.1 Alati za uspostavu digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019).....	26
Slika 4.2 Alati za opažanje i kontrolu fizičkog svijeta (Qi i dr., 2019).....	27

Slika 4.3 Alati za geometrijsko modeliranje (Qi i dr., 2019).....	28
Slika 4.4 Alati za upravljanje podacima digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019).....	29
Slika 4.5 Alati za primjenu usluga digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019).....	31
Slika 4.6 Alati za umrežavanje digitalnih dvojnika (Qi i dr., 2019).....	32
Slika 5.1 Alati za prikupljanje ulaznih podataka softvera „ContextCapture“ (URL 11).....	34
Slika 5.2 Prikaz ispravnog načina prikupljanja podataka (URL 11).....	36
Slika 5.3 Sučelje modula „ContextCapture Master“.....	37
Slika 5.4 Prikaz rezultata provedene aerotriangulacije.....	39
Slika 5.5 Ograničavanje područja izrade modela digitalnog dvojnika radio uređaja.....	40
Slika 5.6 Digitalni dvojnik radio uređaja.....	41
Slika 6.1 Prikaz silosa Resnik unutar „Google Maps 3D“ platforme.....	42
Slika 6.2 „DJI Phantom 4 Pro v2.0“ (URL 12).....	43
Slika 6.3 Učitavanje snimki u „ContextCapture Master“ modul.....	44
Slika 6.4 Prikaz pozicija drona u trenutku prikupljanja pojedine snimke.....	45
Slika 6.5 Postavke za provođenje aerotriangulacije.....	46
Slika 6.6 Izvješće provedene aerotriangulacije.....	46
Slika 6.7 Rezultati provedene aerotriangulacije.....	47
Slika 6.8 Rezultati provedene aerotriangulacije – naglasak na silos.....	47
Slika 6.9 Ograničavanje područja izrade digitalnog dvojnika.....	48
Slika 6.10 Odabir strukture modela.....	49
Slika 6.11 Odabir formata modela.....	49
Slika 6.12 Izvješće završne obrade podataka.....	50
Slika 6.13 Digitalni dvojnik silosa.....	51
Slika 6.14 Digitalni dvojnik silosa.....	51
Slika 6.15 Digitalni dvojnik silosa.....	52
Slika 6.16 Digitalni dvojnik silosa.....	52
Slika 6.17 Digitalni dvojnik silosa.....	53
Slika 6.18 Digitalni dvojnik silosa.....	53
Slika 6.19 Digitalni dvojnik silosa unutar modula „ContextCapture viewer“.....	54
Slika 6.20 Struktura oplošja digitalnog dvojnika silosa.....	55
Slika 6.21 Primjer upotrebe digitalnog dvojnika za analizu konstrukcije objekta.....	55



## SOBNE INFORMACIJE



## Curriculum vitae

### PETAR BRIZIĆ

Trondheimska 4B, Split, 21000, Hrvatska.

021-462-250 099-676-0850

[brizicpetar@gmail.com](mailto:brizicpetar@gmail.com)

Spol Muški | Datum rođenja 10/10/1997 | Državljanstvo hrvatsko

RADNO MJESTO NA KOJE SE  
PRIJAVLJUJETE  
ZVANJE  
ŽELJENO RADNO MJESTO  
STUDIJ NA KOJI SE  
PRIJAVLJUJETE  
OSOBNİ PROFIL

### Posao u geodeziji i geoinformatici

#### RADNO ISKUSTVO

Upišite datumima (od - do)

Ured ovlaštenog inženjera geodezije Ivan Dunkić (1.7.2018.-15.7.2018.)

- Pomoć u geodetskim poslovima na terenu

#### OBRAZOVANJE I OSPOSOBLJAVANJE

Upišite datumima (od - do)

### Fakultet geodezije i geoinformatike

Zamijenite razinom  
NKO-a ako je  
primjenjivo

Sveučilište u Zagrebu

- Rukovanje geodetskim instrumentima te rad u geoinformatičkim programima

#### OSOBNİ VJEŠTINE

[Izbrišite sva prazna polja.]

Ostali jezici

	RAZUMIJEVANJE		GOVOR		PISANJE
	Slušanje	Čitanje	Govorna interakcija	Govorna produkcija	
Engleski	C1	C1	B2	B2	B2
	Polyglote Institute				
Njemački	A2	B1	A2	A2	B1
	Polyglote Institute				

Stupnjevi: A1/2: Temeljni korisnik - B1/B2: Samostalni korisnik - C1/C2 Iskusni korisnik  
[Zajednički europski referentni okvir za jezike](#)

#### Komunikacijske vještine

- Odlične komunikacijske vještine stečene dugogodišnjim radom u trgovini (prodaja drva i božićnih drvca) te radom u turizmu kao zapovjednik jahte do 18 metara

#### Organizacijske / rukovoditeljske

## Curriculum vitae

vještine ▪ Iskustvo donošenja odluka u stresnim situacijama. Organizacija na najvišem nivou.

Poslovne vještine ▪ Komunikacija, organizacija i staloženost.

Digitalne vještine

SAMOPROCJENA				
Obrada informacija	Komunikacija	Stvaranje sadržaja	Sigurnost	Rješavanje problema
Samostalni	Samostalni	Samostalni	Temeljni	Temeljni

Stupnjevi: Temeljni korisnik - Samostalni korisnik - Iskusni korisnik  
[Digitalne vještine - tablica za samoprocjenu](#)

▪

Vozačka dozvola B, skiperska do 18 metara