

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Lucija Šain

**PRIMJENA DIGITALNOG BLIZANCA U  
UPRAVLJANJU GRADOVIMA NA PRIMJERU  
GRADA PULE**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

Lucija Šain ♦ DIPLOMSKI RAD ♦ 2022.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEODETSKI FAKULTET**

Lucija Šain

**PRIMJENA DIGITALNOG BLIZANCA U  
UPRAVLJANJU GRADOVIMA NA PRIMJERU  
GRADA PULE**

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

# 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, **Lucija Šain**, (JMBAG: 0108079121), rođena dana 16.5.1995. u Puli, 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>	Lucija Šain
<b>Datum i mjesto rođenja:</b>	16. svibnja 1995., Pula, Republika Hrvatska
<b>II. DIPLOMSKI RAD</b>	
<b>Naslov:</b>	Primjena digitalnog blizanca u upravljanju gradovima na primjeru Grada Pule
<b>Broj stranica:</b>	82
<b>Broj tablica:</b>	3
<b>Broj slika:</b>	82
<b>Broj bibliografskih podataka:</b>	23 + 54 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>Voditelj:</b>	Zvonimir Nevistić, mag. ing. geod. et geoinf.
<b>III. OCJENA I OBRANA</b>	
<b>Datum zadavanja teme:</b>	13.1.2022.
<b>Datum obrane rada:</b>	19.9.2022.
<b>Sastav povjerenstva pred kojim je branjen diplomski rad:</b>	prof. dr. sc. Željko Bačić
	prof. dr. sc. Dragan Špoljarić
	izv. prof. dr. sc. Hrvoje Tomić

## **Zahvala**

*Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Željku Bačiću i voditelju, Zvonimiru Nevistiću, mag. ing. geod. et geoinf., na pristupačnosti, savjetima te uloženom znanju i vremenu pri izradi ovog diplomskog rada.*

*Također, zahvaljujem svojim prijateljima i kolegama koji su me pratili na mojem putu i uljepšali studentske dane.*

*Najveću zahvalnost dugujem svojim roditeljima te braći, Filipu i Karlu, na bezuvjetnoj podršci tijekom cijeloga života.*

### ***Primjena digitalnog blizanca u upravljanju gradovima na primjeru Grada Pule***

**Sažetak:** Trend rastuće urbanizacije donosi brojne izazove za urbane sredine pri čemu se koncept i vizija pametnih gradova nameću kao rješenje za sadašnje i buduće izazove upravljanja gradovima i poboljšanja kvalitete života građana. Razvoj koncepta pametnih gradova potaknut je prodorom i razvojem inovativnih tehnologija, a njihovom primjenom ostvaruje se unaprjeđenje gradskih procesa, usluga, održivosti te ekonomičnosti. Kroz bolje ekonomske prilike naglašava se konkurentnost gradova, primarnih pokretača prosperiteta i urbanog razvoja. Uspješnija provedba novih koncepata upravljanja gradom omogućena je stvaranjem virtualnih kopija urbanih sredina, materijaliziranih u kontekstu digitalnih blizanaca. Digitalni blizanci se danas izrađuju u svim aspektima ljudskog djelovanja: proizvodnom sektoru, svemirskoj industriji, medicini i mnogim drugim. Projekcije različitih istraživanja predviđaju eksponencijalan rast tržišta tehnologije digitalnih blizanaca i daljnje moguće primjene istih. Digitalni blizanci za upravljanje gradskim područjima uspostavljaju se za dio grada, pametnu četvrt ili na razini čitavog grada. U okviru ovog rada razvijen je 3D model, okosnica digitalnog blizanca, testnog područja grada Pule. Svrha uspostave virtualne platforme je ukazati na mogućnosti primjene kroz provođenje analiza, simulacija, optimizacija i predikcija. U skladu s globalnim i europskim održivim ciljevima, suradnjom s gradskom upravom, konkretizirani su specifični problemi. Testirane su praktične primjene digitalnog blizanca gradske četvrti kroz tematiku solarizacije krovova, utjecaja planiranog razvoja na okolinu te racionalizacije potrošnje energije javne rasvjete.

**Ključne riječi:** održivi razvoj, pametan grad, digitalni blizanac, analiza solarnog potencijala, analiza sjena.

### ***The use of a digital twin in city management as demonstrated by the City of Pula***

**Abstract:** *The trend of growing urbanization brings numerous challenges for urban environments, whereby the concept and vision of smart cities are imposed as a solution to the current and future challenges of managing cities and improving the quality of life of citizens. The development of the concept of smart cities is stimulated by the penetration and development of innovative technologies, and their application improves city processes, services, sustainability, and the economy. Through better economic opportunities, the competitiveness of cities, the primary drivers of prosperity and urban development, is emphasized. The successful implementation of new city management concepts is made possible by the creation of virtual copies of urban environments, materialized in the context of digital twins. Digital twins are being created today in all aspects of human activity: the manufacturing sector, the space industry, medicine, and many others. The projections of various research suggest the exponential growth of the digital twin technology market and its further possible applications. Digital twins for the management of urban areas are established for a part of a city, a smart district or at the level of an entire city. As part of this work, a 3D model was developed, which is the backbone of the digital twin, of the test area of the city of Pula. The purpose of establishing a virtual platform is to point out the possibilities of application through analysis, simulation, optimization, and predicting. In accordance with global and European sustainable goals and cooperation with the city administration, specific problems have been concretized. Practical applications of the digital twin of the city district were tested through the topics of solarization of roofs, the impact of proposed development on the environment, and the rationalization of public lighting energy consumption.*

**Keywords:** *sustainable development, smart city, digital twin, solar potential analysis, shadow analysis.*

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PAMETAN GRAD.....	2
2.1 KONCEPT PAMETNOG GRADA .....	3
2.2 EKONOMSKE KORISTI USPOSTAVE PAMETNOG GRADA .....	5
2.3 VODEĆI PAMETNI GRADOVI U SVIJETU.....	6
3. DIGITALNI BLIZANAC .....	9
3.1 DEFINICIJA DIGITALNOG BLIZANCA.....	9
3.2 POVIJEST KONCEPTA DIGITALNOG BLIZANCA.....	10
3.3 PRIMJENE KONCEPTA DIGITALNOG BLIZANCA.....	11
3.3.1 Automobilaska industrija .....	12
3.3.2 Medicina.....	13
3.3.3 Digitalni blizanac Zemlje .....	15
3.4 DIGITALNI BLIZANAC- PREDVIĐANJA ZA BUDUĆNOST .....	16
4. DIGITALNI BLIZANAC NA RAZINI GRADA.....	18
4.1 METODOLOGIJA USPOSTAVE DIGITALNOG BLIZANCA GRADA .....	20
4.2 VIŠESLOJNA STRUKTURA DIGITALNOG BLIZANCA GRADA .....	20
4.3 IZAZOVI PRI USPOSTAVI DIGITALNOG BLIZANCA GRADA .....	22
4.4 DIGITALNI BLIZANCI GRADOVA U SVIJETU .....	23
4.4.1 Digitalni blizanac Singapura .....	23
4.4.2 Digitalni blizanac okruga Kalasatame u Helsinkiju .....	25
5. ULOGA DIGITALNOG BLIZANCA U ODRŽIVOM RAZVOJU .....	28
5.1 USPOSTAVA ENERGETSKI UČINKOVITIH ČETVRTI.....	28
5.2 GRAD PULA- PAMETAN GRAD .....	29
5.3 SPECIFIČNA PROBLEMATIKA.....	30
6. USPOSTAVA DIGITALNOG BLIZANCA .....	31
6.1 TESTNO PODRUČJE.....	32
6.2 IZRADA DIGITALNOG MODELA POVRŠINE I ORTOMOZAIKA .....	33
6.3 PRIPREMA SLOJEVA .....	37
6.3.1 Priprema rasterskih podataka .....	37
6.3.2 Priprema vektorskih podataka .....	41
6.4 OKOSNICA DIGITALNOG BLIZANCA.....	42
6.4.1 3D model zgrada.....	42
6.4.2 3D model stabala .....	45
6.4.3 3D model rasvjetnih tijela .....	48

6.5 DOBIVENI REZULTATI .....	50
7. PRIMJENA USPOSTAVLJENOG DIGITALNOG BLIZANCA.....	52
7.1 ANALIZA SOLARNOG POTENCIJALA KROVOVA ZGRADA .....	52
7.1.1 Procjena sunčeva zračenja za 2022. godinu .....	52
7.1.2 Identifikacija odgovarajućih krovnih površina.....	55
7.1.3 Procjena proizvodnje električne energije .....	57
7.2 ANALIZA UTJECAJA SJENA PLANIRANOG OBJEKTA.....	60
7.2.1 Procjena sjena.....	60
7.2.2 Analiza sjena.....	63
7.3 ANALIZA DOMETA SENZORA RASVJETNIH TIJELA.....	67
8. ZAKLJUČAK .....	72
LITERATURA.....	73
POPIS SLIKA .....	80
POPIS TABLICA.....	82

## 1. UVOD

Urbanizacija predstavlja jedan od četiri vodećih svjetskih demografskih trendova uz rast globalnog stanovništva, starenje populacije i međunarodne migracije. Trenutno u gradovima živi više od polovice svjetskog stanovništva (UN-DESA, 2019). Unatoč iskustvu pandemije COVID-19, dugoročne procjene ukazuju na daljnji trend urbanizacije s predviđanjima od 60,4 posto urbanog stanovništva do kraja 2030. godine. Pri čemu, najveći porast očekuje se u slabije razvijenim regijama istočne i južne Azije te Afrike, točnije Kini, Indiji i Nigeriji (UN-Habitat, 2020).

S time u vezi, međunarodna zajednica se od 2015. godine kroz niz sporazuma zalaže za provođenje politika održivog razvoja na globalnoj razini, pri čemu se upravo lokalne samouprave prepoznaju kao ključni partneri pri postizanju ciljeva (UN-Habitat, 2020). Isto tako, na nacionalnoj razini donesena je Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine s naglaskom na razvoj pametnih i održivih gradova s ciljem jačanja regionalne konkurentnosti (Narodne novine, 2021).

Stoga, sukladno trendovima, ključno je uvođenje suvremenih tehnoloških, logističkih i organizacijskih rješenja te stvaranje novog okvira urbanog razvoja čime će se osigurati održivi razvoj budućih gradova. Jedan od inovativnih koncepata upravljanja zajednicom je koncept pametnog grada. Pametni gradovi podržavaju pametno upravljanje s ciljem stvaranja zadovoljnih građana uz ubrzani socio-kulturni i ekonomski razvoj. Implementacija koncepta olakšana je prodorom velikih količina podataka koji se prikupljaju, obrađuju, vizualiziraju i distribuiraju u gotovo realnom vremenu. Stoga, za realizaciju pametnih gradova ključan je napredak računalne tehnologije, komunikacijskih mreža, senzora i Interneta stvari - Internet of Things (IoT).

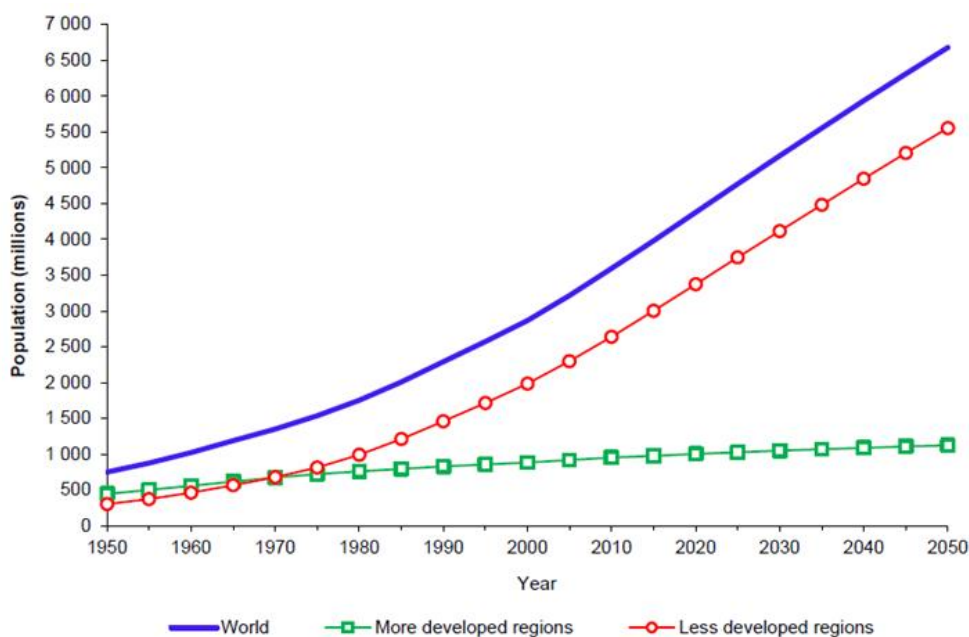
S druge strane, realizacija je omogućena stvaranjem slike grada, replikacije stvarnog urbanog okruženja, što se danas materijalizira u kontekstu digitalnih blizanaca. Koncept digitalnih blizanaca pronalazi sve širu primjenu u modernom svijetu, a pogotovo u upravljanju gradovima s ciljem povećanja efikasnosti, ekonomičnosti, očuvanja okoliša i energetske učinkovitosti. Nadalje, digitalni blizanci su primarni pokretači urbane digitalizacije te kao takvi ključni za postizanje navedenih strategija i ciljeva pametnog upravljanja i održivog razvoja.

Svrha ovog rada je praktično pokazati mogućnosti primjene digitalnih blizanaca kao nezaobilaznog alata pri upravljanju pametnim gradovima u Hrvatskoj, konkretno gradu Puli. Nadalje, kroz uspostavu segmenta digitalnog dvojnika na ograničenom setu podataka testnog područja ispitati unaprjeđenja koje pruža najnoviji geoprostorni koncept. Teoretska osnova uspostave inovativnih koncepata opisana je u drugom i trećem poglavlju. Dok, konkretna primjena digitalnih blizanaca u području upravljanja gradovima na primjerima opisana je u četvrtom poglavlju. Isto tako, u petom poglavlju je predstavljen širi okvir uloge digitalnih blizanaca u ostvarivanju ciljeva održivosti, kao i položaj grada Pule u kontekstu pametnog grada i specifične problematike ostvarivanja strategija energetske učinkovitosti. U petom poglavlju je predstavljena uspostava samog digitalnog blizanca testnog područja. Na kraju slijedi analiza pojedine problematike te zaključak.

## 2. PAMETAN GRAD

Upravo je razdoblje COVID-19 pandemije istaknulo važnost gradova kao ekonomskih središta. Već navedeno, dugoročni trendovi urbanizacije su unatoč pandemiji u uzlaznoj putanji (slika 2.1.). Isto tako, iskustvo pandemije je ukazalo na važnost potrebe za podacima i umreženosti. Pritom, ključan je trenutak primjene tehnologije u gradskim sredinama za ostvarivanje ciljeva. Nadalje, osim predviđanja rasta broja stanovnika u gradovima, procjene rasta urbanih područja su još značajnije. Nekontrolirana ekspanzija gradova utječe na nekontroliranu potrošnju energije, emisiju stakleničkih plinova te općenito klimatske promjene te tako degradiranje okoliša (UN-Habitat, 2020).

Dodatno, neplansko urbano širenje gradova generira dodatne izazove održive mobilnosti, sigurnosti, upravljanja resursima i otpadom. Isto tako, postojeća infrastruktura, pogotovo u slabije razvijenim područjima nije dovoljna za pružanje kvalitetne podrške u stanovanju, zapošljavanju, obrazovanju i zdravlju ljudi. Pritom, gradovi, koji se nameću kao glavni katalizatori ekonomskog razvoja i prosperiteta primarni su pokretači održivog razvoja. Stoga, lokalne samouprave su centralne jedinice razvoja i ostvarivanja ekonomskih koristi kroz primjenu novih inteligentnih koncepata upravljanja zajednicom.



Slika 2.1. Projekcija urbane populacije svijeta, razvijenih i manje razvijenih regija od 1950. do 2050. (UN-DESA, 2019)

Pametnan grad je jedan od koncepata koji nudi rješenja za sadašnje i nadolazeće izazove. Razvoj pametnih gradova olakšan je prodorom inovativnih tehnologija čijom primjenom se povećava produktivnost i učinkovitost gradskih usluga. Isto tako, korištenjem digitalnih tehnologija stvaraju se podloge za inovativne ideje, rast i ekonomski prosperitet urbanih sredina. Nadalje, primjena koncepta pametnog grada omogućuje društvenu uključenost te u konačnici održivi razvoj i stvaranje bolje okoline ljudi za kvalitetniji život.

## 2.1 KONCEPT PAMETNOG GRADA

Pametni gradovi su relativno novi koncept nastao kao posljedica istraživanja pametnog urbanog okruženja sa sve većom aplikativnosti u budućnosti. Međutim, ne postoji jedinstvena definicija koncepta pametnog grada, područja koje je još uvijek nedovoljno istraženo. Naime, puno je načina i smjerova koji nastoje objasniti što je koncept pametnoga grada i što on zapravo obuhvaća. Pritom, različite definicije identificiraju iste karakteristike koje mogu biti grupirane u nekoliko tematskih skupina koje čine grad pametnim. Kako je stvaranje pametnog grada proces, a ne jedinstvena definicija, tako bilo koja kombinacija navedenih karakteristika čini grad pametnim, nije nužno zadovoljiti sve definicije (Nevistić i Bačić, 2022).

Literatura ukazuje na niz definicija sukladno pojedinom gledištu (ovisno o kontinentu, državi, gradu, stručnjaku, okruženju). „Na globalnoj razini postavljeni su različiti prioriteti u razvoju pametnih gradova: u Sjevernoj Americi je naglasak na pametnim mrežama, u Europi na regeneraciji i održivosti, u Aziji više na pitanjima urbanizacije i e-upravljanja, a u Latinskoj Americi najviše na unaprjeđenju transportnih sustava“ (URL1).

Europska komisija (EK) definira pametan grad kao „područje unaprjeđenja tradicionalnih veza i usluga korištenjem digitalnih rješenja s pozitivnim učincima na građane i poslovanje.“ Isto tako, osim smanjenja štetnih učinaka na okoliš i bolje iskorištavanje energetske resursa, u pametnom gradu se uspostavlja povezaniji gradski prijevoz i energetska samodostatnost zgrada. Nadalje, u kontekstu definicije Europske komisije naglasak je na interaktivnijoj i odgovornijoj gradskoj upravi, sigurnosti te povećanoj brizi za stariju populaciju (URL 2).

Zatim, „cijeli koncept pametnoga grada zapravo je osmišljen i usmjeren k traženju načina koji se može inteligentno primijeniti te kojim se može pristupiti razvoju i međusobnom povezivanju inovativnih i modernih tehnoloških rješenja koja bi trebala svakom pojedincu u nekom gradu omogućiti kvalitetniji suživot u gradskom okruženju“ (Paliaga i Oliva, 2018).

U stvaranju koncepta pametnih gradova značajnu ulogu imaju i tvrtke koje osim pružanja inovativnih rješenja, ulaganja u razvoj i tehnologije, ostvaruju i ekonomsku dobit. Prema IT Chroniclesu prvo mjesto na listi tvrtki koje stvaraju pametne gradove zauzima Cisco Systems (URL 3). Na svojim stranicama Cisco iznosi definiciju pametnog grada: „Pametan grad koristi digitalnu tehnologiju za povezivanje, zaštitu i bolju kvalitetu života građana. Pritom, IoT senzori, videokamere, društveni mediji i drugi djeluju kao povezani sustav, pružajući tako gradskoj upravi i građanima stalnu povratnu informaciju kako bi mogli donositi utemeljene odluke“ (URL4).

Prema Caragliu i dr. (2009) pametni grad se temelji na šest dimenzija: pametnoj ekonomiji, pametnoj mobilnosti, pametnom okolišu, pametnim ljudima, pametnom življenju i pametnom upravljanju. Pametna ekonomija uključuje inovativnost, produktivnost, poduzetništvo i ekonomske pokazatelje, pri čemu je tržište rada fleksibilno uz poticanje međunarodne suradnje. Dok, pametnu mobilnost karakterizira pristupačnost, dostupnost infrastrukture te održivi, inovativni i sigurni prometni sustavi. Nadalje, pametni okoliš uključuje pametnu brigu o resursima, smanjenje zagađenja okoliša te općenito održivi okoliš. Isto tako, pametni ljudi su visokokvalificirani stručnjaci s afinitetom za cjeloživotno učenje. Nadalje, fleksibilni su, kreativni te aktivno sudjeluju u javnom životu pri čemu je naglašena etnička i socijalna raznolikost. Pametno življenje je bogato kulturnim sadržajima, zdravstvena skrb je osigurana, a sigurnost i kvaliteta stanovanja građana je na visokoj razini.

Kod pametnog življenja, značajno se ulaže u obrazovanje te društvenu solidarnost. Pametna vlast sudjeluje u donošenju odluka, olakšano je pružanje usluga građanima, a političke strategije i razvojni planovi su održivi (Grubišić, 2014).

„Najjednostavnije rečeno, pametni grad je vizija urbanog razvoja u kojem se koristi digitalna i komunikacijska tehnologija (ICT) i Internet stvari (IoT), kako bi se što bolje zadovoljile potrebe građana i unaprijedila učinkovitost gradskih usluga“ (URL 5). Unatoč različitim definicijama tumačenja koncepta pametnog grada, sve definicije ukazuju na važnost korištenja tehnologije i podataka za povezivanje ljudi, stvaranje inteligentnih zgrada i poboljšanje transportnog sustava (Yadav i dr., 2019).

Pametni gradovi sve više primjenjuju tehnologije kao što su ICT, Big Data i IoT te rasprostranjene senzore, stvarajući tako gradove budućnosti (slika 2.2.). Korištenje pametnih tehnologija i dostupnost velikih količina podataka omogućuje gradovima stvaranje ažurnije gradske uprave, donošenje inovativnih rješenja upotrebom pametnih mreža te povećanje energetske učinkovitosti. Kroz smislenu organizaciju povećano je korištenje čiste energije, alternativnih načina prijevoza, a posljedično i smanjena emisija stakleničkih plinova. Nadalje, stvaranjem sigurnijih javnih prostora te smanjenjem onečišćenja s naglaskom na održivu ekonomiju, okoliš i socijalno okruženje kreirani su preduvjeti bolje kvalitete života ljudi na vidljiv i konkretan način. Samim time, podignut je standard življenja, a zadovoljni građani stvaraju bolje ekonomske prilike.



Slika 2.2 Koncept pametnog grada (URL 6)

## 2.2 EKONOMSKE KORISTI USPOSTAVE PAMETNOG GRADA

Zasigurno da uspostava pametnog grada koji se temelji razvoju postojeće infrastrukture, tehnologije i uvođenju inovacija zahtjeva visoka početna ulaganja. Stoga, razumljivo se postavlja pitanje ekonomskih učinaka istih. Gradovi 21. stoljeća su povezaniji, a kroz bolje ekonomske prilike naglašava se globalna konkurentnost. Pritom, uvođenjem novih koncepata upravljanja zajednicom javljaju se izravne ekonomske prednosti, a unaprjeđenjem različitih segmenata urbane sredine i posljedične ekonomske koristi. Prema istraživanju Juniper Researcha (2022) projekti pametnih gradova će do 2026. godine dostići uštede energije u vrijednosti od 96 milijardi dolara (URL 7). U jedinicama električne energije, ušteda je ekvivalentna 1000 TWh što je dovoljno za pokrivanje područja Velikog Londona u razdoblju od 5 godina. Stoga, ne čudi sve veći broj inicijativa ulaganja u koncept pametnih gradova s povećanjem energetske održivosti te dugoročnim povratom početnih ulaganja.

U svom radu Wiršbinna (2021) kategorizira moguće ekonomske koristi koncepta pametnog grada u 9 područja napretka: efikasnost, uštede, sigurnost, atraktivnost grada, povezivost, održivost, pametan transport, pametne zgrade i financiranje. Zatim, Grega i Wiršbinna (2021) navode ista područja podjele uz mjerljivost inicijativa pametnih gradova. Prema istraživanju je navedeno objašnjenje danih kategorija ekonomskih doprinosa uspostave koncepta pametnog grada.

Efikasnost je usko povezana s digitalizacijom. Što je neki sustav povezaniji s informacijskom tehnologijom to su njegove usluge i povezanost s građanima učinkovitiji. Nadalje, u okviru pametnog grada povećana je mobilnost građana. Isto tako, olakšana je sposobnost evaluiranja, mjerenja i usporedbe podataka. Zatim, gradske usluge su učinkovitije, a pristup građanima je jednostavniji. Učinkovitost se može očitati u više područja, a značajno je izražena u smanjenju potrošnje energije. Za postizanje učinkovitosti važno je smanjiti gubitke (URL 8). Pametni gradovi to ostvaruju korištenjem senzora koji prikupljaju podatke o okolini te tako reguliraju gubitke. ABI Research (2018) navodi kao su pametna javna rasvjeta i pametne zgrade najvažniji izvori povećane učinkovitosti koji mogu dovesti do 5 milijardi dolara ukupne uštede godišnje (URL 9).

Sljedeće za istaknuti je da, digitalizacija procesa značajno pridonosi smanjenju troškova. Usluge su jeftinije, a troškovi održavanja manji. Isto tako, sigurnost je važan aspekt pametnog grada te pokriva više razina. Gradski kontrolni centri pružaju podatke o prometu, sensorima, ljudima te kao takvi su nužni u reagiranju pri odgovoru u katastrofi, hitnim intervencijama ili npr. prometnim zakrčenjima. Nadalje, pozitivne okolnosti privlače visokokvalificirane ljude. Pametan, siguran i sretan grad je pozivnica za življenje. Visok standard života otvara ekonomske prilike, a na gradskoj upravi je administrativno olakšati priljev obrazovanih ljudi. Uz prilike za život i rad, atraktivan grad je konkurentan za turizam, granu sa značajnim ekonomskim koristima. Zatim, povezivost je okosnica pametnog grada, a u središtu je IoT tehnologija. Uz napredne mreže, Big Data i otvorene platforme stvara se podloga za ekonomski razvoj. Otvoreni podaci pružaju prilike i ekonomske prednosti, ali i otvaraju specifično područje osjetljivosti podataka. Nadalje, održivost pametnih gradova je prioritetna kategorija. Kod ekonomskih koristi održivog grada naglasak je obnovljivim izvorima energije, modernoj

kružnoj ekonomiji i smanjenju emisije ugljikovog dioksida te općenito prevenciji onečišćenja okoliša. Primjer održivosti je grad Fujisawa koji je 2015. godine pokrenuo Fujisawa Sustainable Smart Town projekt čime je 1000 kućanstava povezano pametnom mrežom na solarni pogon (URL 10). Inicijativom je smanjena emisija ugljikovog dioksida za 70 posto, a 30 postotnim povratkom energije u mrežu omogućene su ekonomske koristi. Pametni transport uključuje električna vozila i povezanu infrastrukturu s dekarbonizacijom prometa. Isto tako, uvođenjem autonomnih vozila u javni prijevoz olakšano je upravljanje prometnim gužvama. Prelaskom na čistu energiju, posljedičnim smanjenim štetnim utjecajem na okoliš te povezanim autonomnim vozilima značajno se može uštedjeti vrijeme i novac. Nadalje, pametne zgrade su bitan faktor inicijative pametnog grada. Pritom, ekonomski učinci su ostvareni prvenstveno poboljšanjem energetske učinkovitosti. Ekonomske koristi proizlaze iz korištenja obnovljivih izvora energije, pametnih tehnoloških rješenja te pametnih mreža. Stoga, uštede se ostvaruju kroz kontrolirano trošenje energije i povezivost. S tim u vezi, stvaraju se područja pozitivne energije, odnosno ona koja troše manje energije ili proizvode više nego što troše iz obnovljivih izvora energije. Takve inicijative stvaranja područja pozitivne energije donose ekonomske prednosti.

Konačno, razvoj pametnog grada zahtjeva početni kapital za unaprijeđenje infrastrukture i tehnologije. Na razini Europske unije (EU) postoje osigurana sredstva i poticaji u okviru razvoja pametnog grada, ali se takvi ekonomski doprinosi mogu ostvariti jedino uz znanje kako doći do njih. Isto tako, ekonomske prednosti u financiranju se ostvaruju kroz brzi prijenos znanja i iskustva. Prema Gregi i Wirsbinni (2021), u okviru ekonomskih koristi, važna je i mjerljivost inicijativa pametnih gradova. Generalno, teško je mjeriti izravnu ekonomsku korist od uspostavljenih inovativnih mjera. Na razini projekata EU sustav praćenja se uglavnom očituje kroz smanjenje CO<sub>2</sub> ili uštede energije. No, uvođenjem indeksa mjerljivosti te praćenjem promjena na početku uspostave te u razvojnoj točki provedbe može pomoći usmjeravanju projekta i budućih ekonomskih koristi.

### **2.3 VODEĆI PAMETNI GRADOVI U SVIJETU**

Shanghai je zauzeo prvo mjesto na listi pametnih gradova za 2022. godinu prema istraživanju Juniper Researcha. Poredak se temelji na vrednovanju više područja koja definiraju pametni grad, a to su transport i infrastruktura, energija i rasvjeta, upravljanje gradom i primjena tehnologije te urbana povezivost (URL 7). Shanghai je grad koji predstavlja financijsko i gospodarsko središte Kine koja primjenjuje inovativne tehnologije u svrhu donošenja prednosti svojim građanima. I to kroz implementaciju platformi za upravljanje podacima te učinkovito digitalizirano upravljanje gradskim uslugama postajući tako predvodnik u razvoju pametnih gradova.

Pametne strategije Shanghaja jesu (URL 11):

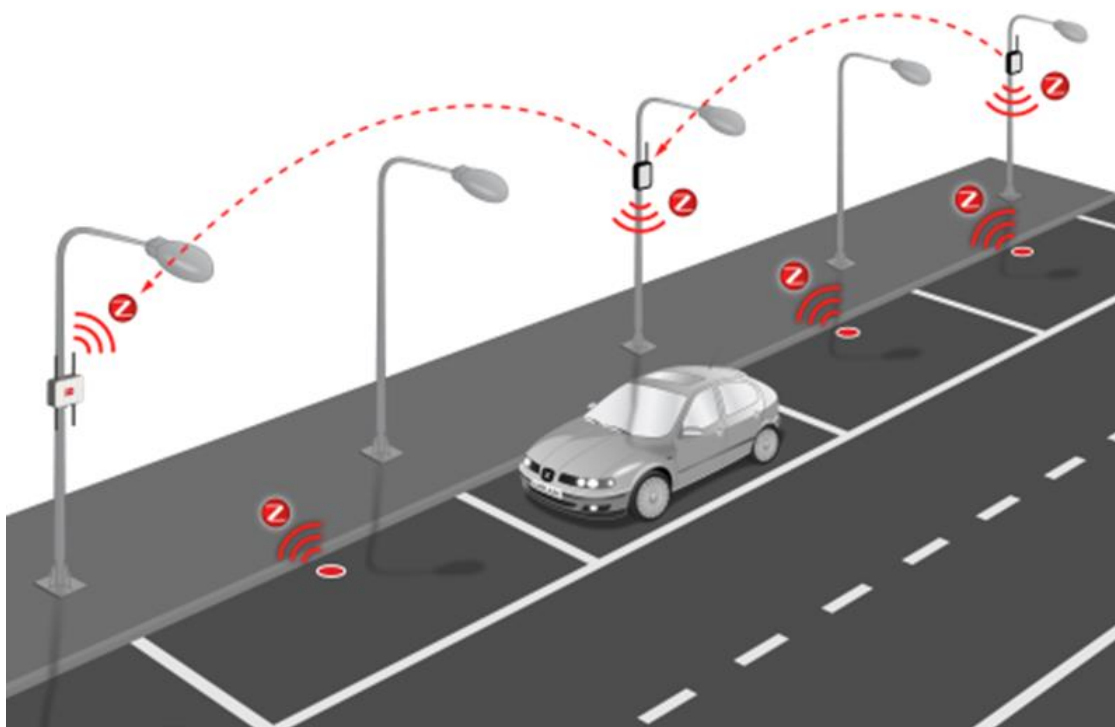
1. Shanghai clone- digitalni blizanac grada koji je precizni virtualni prikaz čitavoga grada s kontinuiranim ažuriranjem i mogućnošću projekcija aktivnosti prikazan na slici 2.3.
2. People-Oriented Smart City- postignuta je puna pokrivenost 5G signalom u centru grada.

3. Citizen Cloud aplikacija- provedeno istraživanje ističe upravo Citizen Cloud aplikaciju Shanghaja, centraliziranu platformu za više od 1000 različitih usluga građanima temeljenu na inovativnim tehnologijama.



Slika 2.3. Digitalni bliznac Shanghaja (URL 12)

Nakon Shanghaja, Seul, Barcelona, Peking i New York su gradovi koji zauzimaju svoje mjesto na listi najistaknutijih pametnih gradova u 2022. godini (URL 7). Barcelona je europski predstavnik u top 5. Glavni grad Katalonije poznat po turističkim znamenitostima predvodi i u *smart city* konceptu. Barcelona već dugi niz godina označava predvodnika implementacije pametnih rješenja koji se temelje na 2 osnovna poboljšanja. Prvo, digitalna transformacija u korištenju i pružanju podataka gradske uprave. Naime, za unaprjeđenje učinkovitosti korištenje modernih tehnologija je ključ za povećanje dostupnosti potrebnih informacija građanima, a i svima zainteresiranim. Nadalje, poboljšana je efektivnost kroz unaprjeđenje suradnje između različitih gradskih dionika: javnih tijela, privatnog sektora i građana. Kroz bolju povezanost svih dionika stvara se pozitivna klima realiziranja gradskih projekata te prilike za gospodarski napredak. Jedan od uspješnijih provedenih projekata je zamjena postojeće rasvjete pametnom Light Emitting Diode (LED) rasvjetom (URL 13). Instaliranim sensorima omogućile su se značajne uštede energije, a time su gradu osigurani i značajni ekonomski učinci. Isto tako, prikupljanjem okolišnih podataka putem senzora stvorila se podloga olakšanom donošenju odluka gradskoj upravi (slika 2.4.).



Slika 2.4. Primjena pametne javne rasvjete u Barceloni (URL 14)

### 3. DIGITALNI BLIZANAC

Digitalni blizanac je sastavnica i ključni pokretač digitalne transformacije. Kao takav, neprestano se nadopunjuje novim konceptima, idejama i tehnologijama. U poglavlju je поближе opisano značenje i pojavnost samog koncepta u svijetu, kao i primjene u različitim aspektima te doprinosi ovog koncepta u uzlaznom razvoju. Isto tako, istaknuta je važnost prepoznavanja koncepta i njegove primjene u postizanju konkurentnosti i ostvarivanja globalnih održivih ciljeva.

#### 3.1 DEFINICIJA DIGITALNOG BLIZANCA

Unatoč velikom interesu i pojavnosti, u literaturi ne postoji jedinstvena i sveobuhvatna definicija digitalnog blizanca. Različite organizacije i autori ovisno o potrebama i primjenama iznose i različite definicije. No ipak, većina definicija temelji se na poimanju digitalnog blizanca kao virtualne replike postojećeg fizičkog objekta koji uključuje dvosmjerni prijenos ili dijeljenje podataka između stvarnog i digitalnog modela (Singh i dr., 2021). Pritom, podaci su kvantitativni i kvalitativni, a najvažnije, ažurirani su u stvarnom vremenu. Digitalni blizanac se tako koristi za dubinske analize, simulacije, optimizacije, predviđanja i kontrole.

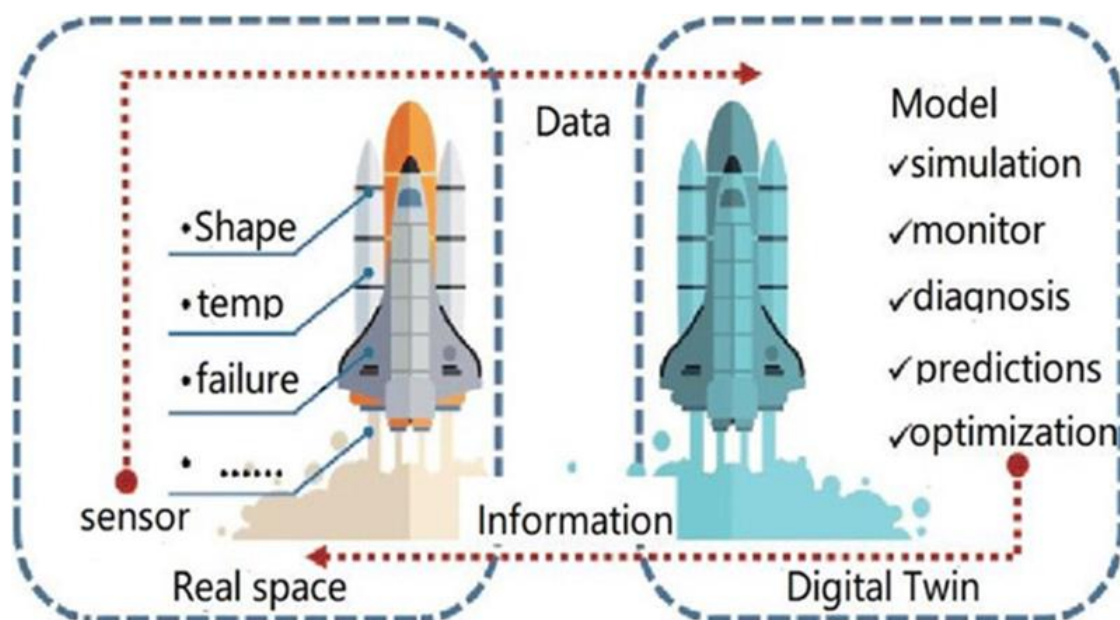
Prva detaljna i prepoznata definicija digitalnog blizanca je NASA-ina iz 2012. godine gdje autori definiraju digitalni blizanac kao „integriranu multifizičku, višeskalalnu, vjerojatnosnu simulaciju vozila ili sustava koji koristi najbolje dostupne fizičke modele, ažuriranja senzora, povijest korištenja opreme i ostala svojstva s ciljem zrcaljenja svog letećeg blizanca“ (Glaessgen i Stargel, 2012).

Kasnije, 2017. godine, Chen (2017) definira digitalni blizanac kao „kompjutoriziran model fizičkog uređaja ili sustava koji predstavlja sve funkcionalne značajke i poveznice s radnim elementima“. Isto tako, godinu nakon Vrabič i dr. (2018) iznose definiciju digitalnog blizanca kao „digitalnog prikaza fizičkog predmeta ili sustava koji se zasniva na integriranim simulacijama i servisnim podacima“. Pritom, digitalna replika temelji se na podacima iz više izvora tijekom životnog ciklusa. Podaci se kontinuirano ažuriraju i prikazuju na različite načine s mogućnošću predviđanja sadašnjih i budućih stanja, dizajna i operativnih značajki, kako bi se stvorilo okruženje za donošenje okoliša.

Nadalje, digitalni blizanac je „digitalni prikaz koji sadrži opisne značajke svog odabranog objekta ili sustava proizvoda i usluga. Takav prikaz sadrži attribute, stanja i ponašanja objekta kroz modele, informacije i podatke u jednoj ili čak više faza životnog ciklusa“ (Stark i Damerau, 2019). Novija definicija karakterizira digitalni blizanac kao „dinamični i samorazvijajući virtualni model ili simulaciju stvarnog subjekta ili objekta (dijela, stroja, procesa, čovjeka i ostalo)“ (Singh i dr., 2021). Replika predstavlja pravo stanje svog fizičkog blizanca u bilo kojem trenutku putem razmjene podataka u stvarnom vremenu uz integriranje povijesti podataka. Konačno, digitalni blizanac je virtualna replika stvarnog proizvoda, procesa ili sustava. On povezuje stvarni i digitalni svijet koristeći senzore za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu. Ti se podaci zatim koriste za stvaranje digitalnog duplikata s ciljem boljeg razumijevanja, analiziranja, manipuliranja ili optimiziranja (URL 15).

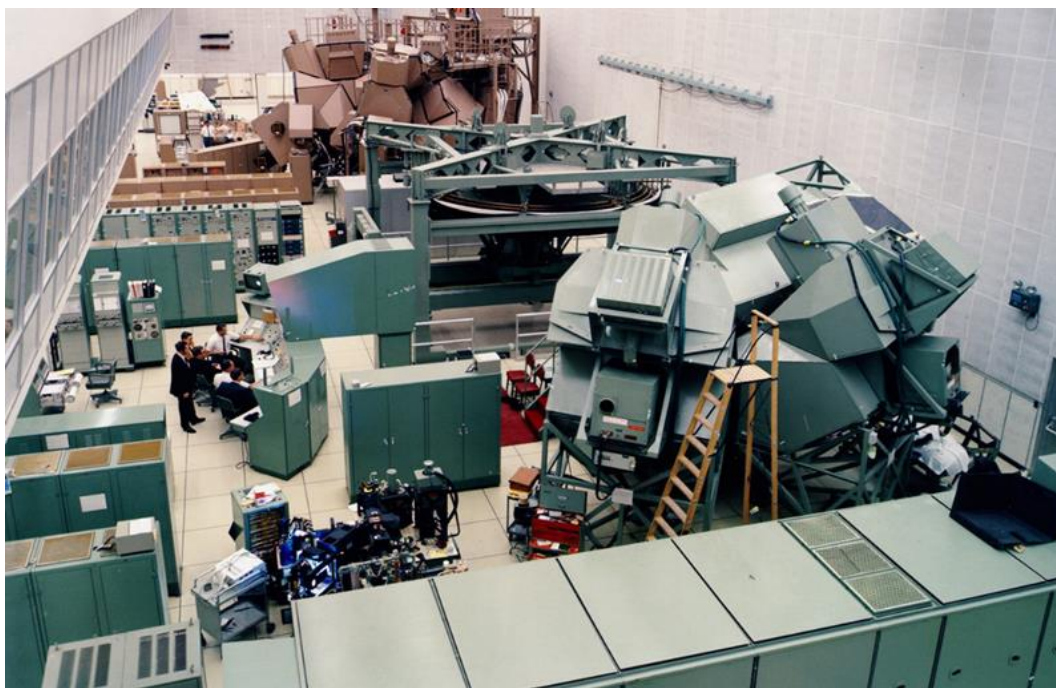
### 3.2 POVIJEST KONCEPTA DIGITALNOG BLIZANCA

Ideja digitalnog blizanca predstavljena je prvi put kao koncept Mirror Worlds Davida Gelerntera 1991. godine. Koncept tehnologije digitalnog blizanca primijenjen u industriji istaknut je 2002. godine predavanjem dr. Michaela Grievesa na Sveučilištu u Michiganu. Pritom, digitalni blizanac naveden je kao temelj konceptualnog modela upravljanjem proizvoda kroz njegov životni vijek- Product Lifecycle Management (PLM) (Grieves, 2016). Koncept uključuje kombinaciju stvarnog i virtualnog prostora te razmjenu informacija i podataka između istih. Pretpostavka koja je pokretala model bila je da se svaki sustav sastoji od dva sustava. Fizičkog, koji je oduvijek postojao i novog virtualnog sustava koji je sadržavao sve informacije o fizičkom sustavu. Model je tada nazvan Mirrored Spaces Model. Naime, radi se o zrcaljenju sustava između onoga što postoji u stvarnom prostoru i onoga što postoji u virtualnom prostoru i obrnuto. Zatim, 2006. godine model je nazvan Information Mirroring Model. Ističe se dvosmjerna veza između stvarnog svijeta i virtualne kopije koja se temelji na virtualnim prostorima koji služe za istraživanje alternativnih ideja. Međutim, u tom razdoblju nedostaju primjene interakcija dvaju sustava te postojanje tehnologije za ostvarenje takvog konceptualnog modela (slika 3.1.).



Slika 3.1. Model zrcaljenja informacija (Guo i Lv, 2022)

Začeci ideje uspostave kopije kao stvarnog modela javljaju se još šezdesetih godina prošlog stoljeća u svemirskoj industriji. National Aeronautics and Space Administration (NASA) je ponukana eksplozijom spremnika kisika Apolla 13 i posljedičnim oštećenjem glavnog motora razvila dvojničnik Apolla 13 koji je omogućio spašavanje astronauta testiranjem mogućih rješenja i izvođenjem simulacija s razine tla (URL 16). Tako je razvijen fizički blizanac s mogućnošću zrcaljenja, dijagnosticiranja, proučavanja, modeliranja, analize i predikcije sličnih događaja (slika 3.2.).



Slika 3.2. Apollo simulatori kontrolne misije u Houstonu (URL 17)

Pedesetak godina kasnije digitalni bliznac usvojen je kao konceptualna osnova u području astronautike i zrakoplovstva. Tako, John Wick 2010. godine uvodi termin digitalnog blizanca u tehnološkim planovima istraživanja svemira. Isto tako, ubrzo je sam koncept usvojen i u zrakoplovstvu Sjedinjenih Američkih Država omogućujući dizajniranje, upravljanje i predviđanje. Danas NASA, zajedno s drugim čimbenicima istraživanja svemira, razvija digitalne dvojnike sustava i komponenti s ciljem uspješnog nastavljanja postojećih i izvođenja novih misija. Šira primjena koncepta u raznim kompanijama u marketinške svrhe započinje 2014. godine. Isto tako, Gartner 2019. godine navodi digitalni bliznac kao jedan od 10 glavnih strateških tehnoloških trendova (URL 18). Od tada, provedena su brojna istraživanja i proširenja tehničke i konceptualne osnove digitalnog dvojnika, a njegova primjena svakog dana pronalazi nova područja.

### 3.3 PRIMJENE KONCEPTA DIGITALNOG BLIZANCA

Kao već navedeno, početak ideje, koncepta te primjene tehnologije digitalnog blizanca je ponajprije u proizvodnom sektoru i svemirskoj industriji. Danas se digitalni blizanci izrađuju u svim segmentima ljudskog djelovanja. U autoindustriji, s naglaskom na primjenu za autonomna vozila. Isto tako, osim u industrijskim procesima, tehnologija digitalnog blizanca donosi pozitivne učinke i u medicinskom području. Danas medicinski stručnjaci svoja znanja ispituju u virtualnom okruženju stvarajući tako digitalne dvojnike ljudskih organa, a u budućnosti i virtualne klonove čitavih pacijenata. Nadalje, projekt uspostave digitalnog modela Zemlje postavio je ambicioznu ljestvicu primjeni digitalnog blizanca za održivi razvoj na globalnoj razini. Pritom, lokalne samouprave su glavni partneri za ostvarivanje i lokaliziranje globalnih razvojnih planova. Uspostava digitalnog blizanca za pojedini grad uskoro će postati nužnost za njegovo efektivno funkcioniranje. U nastavku su detaljnije objašnjene navedene primjene inovativnog koncepta.

### 3.3.1 Automobilska industrija

Razvoj automobilske industrije posljednjih je godina snažno uvjetovan informacijskim tehnologijama, posebno IoT-om i Big Data konceptom sukladno sveprisutnoj digitalizaciji, upravljanjem velikim količinama podataka i umreženosti. S druge strane, automobilske kompanije moraju zadovoljiti visoke kriterije sigurnosti i održivosti, kao i zahtjeve kupaca u što boljem dizajnu i performansama proizvedenih automobila. Upravo je primjena koncepta digitalnih blizanaca ključan alat pri uspostavi vozila budućnosti kojim će se zadovoljiti postavljeni zahtjevi. Digitalni dvojnik uključuje virtualnu repliku kompletnog automobila (slika 3.3.), softvera, električnih i mehaničkih dijelova te funkcionalnosti (URL 19).

Digitalni blizanci u automobilskoj industriji olakšavaju sve faze proizvodnje. Počevši od dizajna, razvoja, nadzora pa do održavanja proizvoda (Rahman i Tadayoni, 2018). Nadalje, omogućena su testiranja dizajna i funkcionalnosti u virtualnom okruženju. Digitalni blizanac predstavlja tehnologiju koja donosi značajne napretke u praćenju, dijagnostici i optimizaciji u automobilskoj industriji. Izvođenjem simulacija smanjuje se potreba za proizvodnjom stotine testnih vozila. Istovremenim sudjelovanjem različitih struka na zajedničkom projektu omogućuje se brži razvoj. Uz smanjenje troškova i uštedu vremena, proizvedeni automobili su sigurniji, pružaju bolje performanse i imaju dulji vijek trajanja.



Slika 3.3. Digitalni blizanac automobila (URL 20)

Tesla je primjer kompanije koja danas kreira digitalni blizanac za svaki proizvedeni automobil. Poboljšanja softvera automobila temelje se na prikupljenim podacima senzora, a zatim se provedena ažuriranja prenose na proizvode kako bi se stvorila poboljšana iskustva vozača. Virtualna replika automobila ponaša se kao testni model temeljen na stvarnim podacima te tako predstavlja realan prikaz stvarnosti. Takva praksa zamijećena je i nakon kritika Consumer Reporta na duljinu zaustavnog puta pri brzom kočenju Modelom 3. Nedugo zatim negativnih osvrta Tesla je online ažurirala postojeći softver te tako u kratkom

vremenu značajno poboljšala performanse i stvorila preduvjete za daljnje poimanje kompanije koja zadovoljava visoke standarde sigurnosti (URL 21).

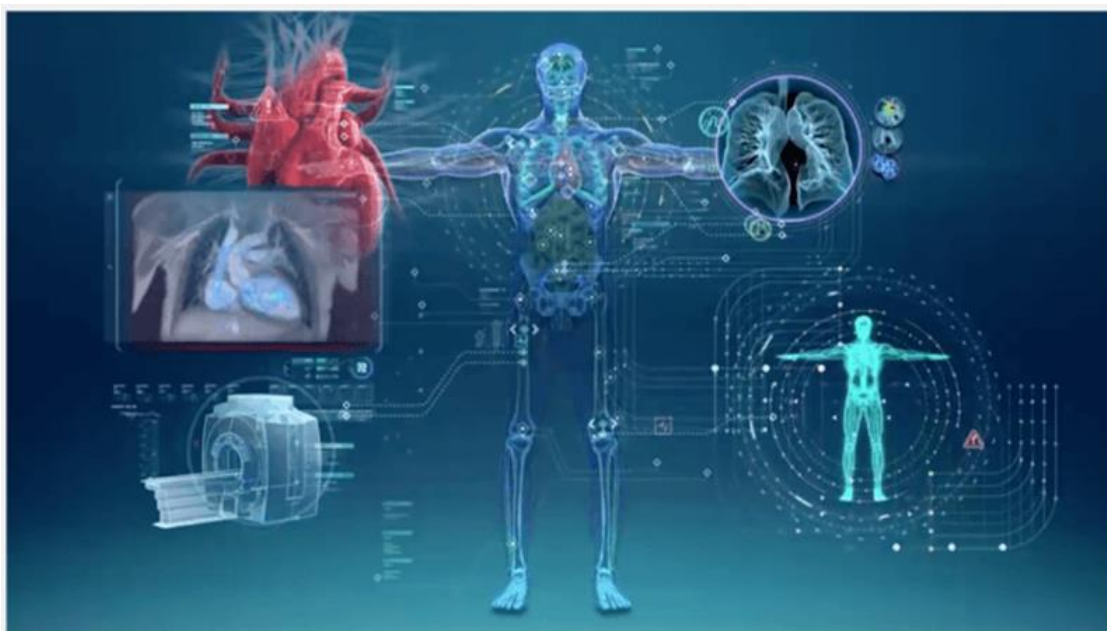
U kontekstu autonomne vožnje stvaraju se virtualne replike stvarnog svijeta koje predstavljaju platformu za rekonstrukciju i modificiranje mogućih scenarija (slika 3.4.). Pritom, NVIDIA je tvrtka koja značajno ulaže u stvaranje takvih platformi koje su interoperabilne s drugim subjektima. Testiranje u virtualnom okruženju omogućuje autonomnim vozilima ispitivanje ponašanja u različitim situacijama i prije nego što se realiziraju u realnim uvjetima (URL 22). Kako su ti procesi povezani dubinskim neuronskim mrežama samim time mijenja se i percepcija autonomnog sustava te stvaraju preduvjete za optimalno donošenje odluka u vožnji te povećanje stupnja sigurnosti.



Slika 3.4. NVIDIA Virtualna stvarnost (URL 23)

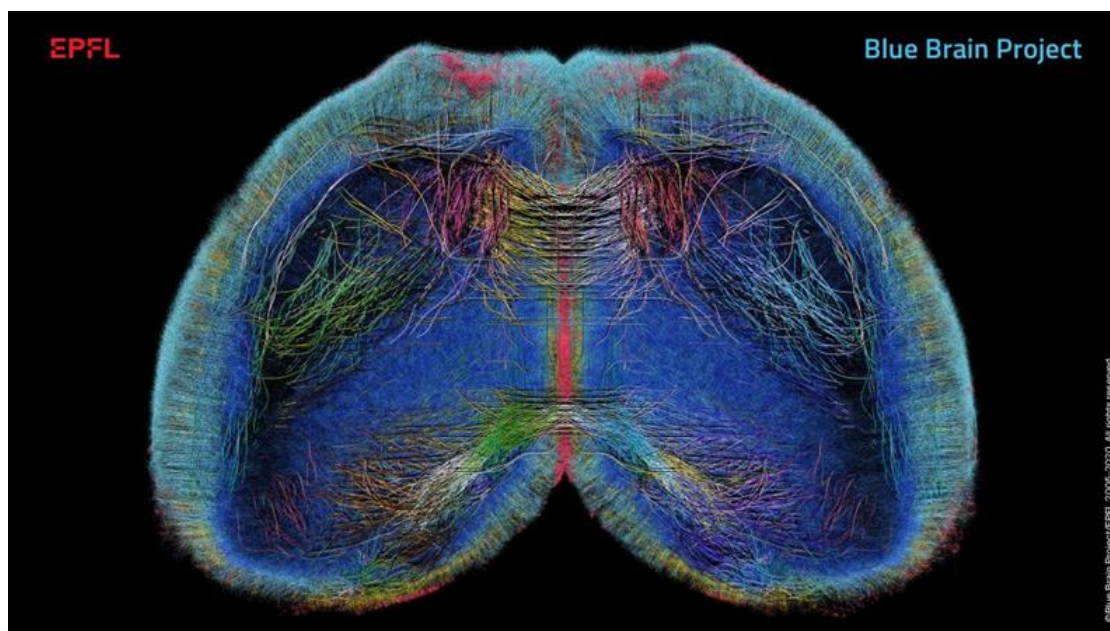
### 3.3.2 Medicina

Medicina je područje s velikim potencijalom primjene tehnologije digitalnih blizanaca. Ljudsko tijelo, područje neprestanog istraživanja, i napredak tehnologije izvrsna su platforma za primjenu digitalnih kopija isprepletenog sustava. Moderna medicina koja se temelji na prevenciji bolesti i poboljšanju kvalitete i produljenju života ljudi putem digitalnih blizanaca to ostvaruje. Pritom, digitalni blizanci omogućuju personaliziranu medicinu, poboljšane dijagnoze i razvoj novih lijekova i uređaja. Krajnji cilj primjene tehnologije digitalnih blizanaca u medicini je stvoriti digitalnog dvojnika pacijenta (slika 3.5.) s individualiziranim pristupom u zdravstvenoj skrbi. Uspostava kompletne replike ljudskog tijela zahtjeva upravljanje velikom količinom podataka i funkcionalnosti s podacima koji se kontinuirano nadograđuju. Danas već postoje brojni senzori praćenja ljudskog zdravlja, a korištenjem umjetne inteligencije moguće je lakše uspostaviti dijagnoze pa i predviđati kako promjene načina života utječu na zdravlje pojedinca.



Slika 3.5. Digitalni blizanac pacijenta (URL 24)

S druge strane, u svijetu postoje višebrojne pa i ostvarene inicijative uspostave digitalnih blizanaca ljudskih organa. Blue Brain Project je švicarska inicijativa osnivača Henryja Markrama u suradnji s Ecole Polytechnique Fédérale de Lausannes (EPFL). Cilj ovog projekta je razvoj detaljne digitalne kopije i simulacije mišjeg mozga (URL 25). Uspostavom digitalnog blizanca mozga nastoji se uvrstiti takva istraživanja u uobičajenu praksu te stvoriti uvjete za razumijevanje strukture i funkcionalnosti mozga na više razina. Na slici 3.6. prikazana je virtualna kopija neokorteksa miša.



Slika 3.6. Digitalni blizanac neokorteksa miša (URL 25)

The Living Heart Project je inicijativa Dassault Systèmes u suradnji s američkom Food and Drug Administration koja okuplja vodeće znanstvenike i specijaliste kardiologije, programere, agencije i predavače s ciljem razvoja preciznih digitalnih modela ljudskog srca. Digitalni modeli srca predstavljaju podlogu koja pomaže u edukaciji i osposobljavanju stručnjaka, olakšanom uspostavljanju dijagnoza, testiranju i implementiranju novih načina liječenja sa svrhom poboljšanja zdravstvene skrbi pacijenta (URL 26). Digitalni blizanci organa mogu poboljšati dizajn, razvoj, testiranje i praćenje novih lijekova i medicinskih uređaja. Pritom, povećava se učinkovitost i pouzdanost, a smanjuju se troškovi i vrijeme trajanja testiranja, kao i primjena istih na životinjama.

Isto tako, u budućnosti bi digitalni blizanci mogli imati značajnu primjenu pri upravljanju bolnicama (URL 27). Uspostavom digitalnog blizanca zdravstvene ustanove povećava se ekonomičnost i učinkovitost cijelog zdravstvenog sustava. Posebice se to pokazalo u razdoblju pandemije COVID-19. Kroz digitalni blizanc i korištenje podataka u stvarnom vremenu, kao i oslanjajući se na prošle događaje, stvaraju se uvjeti za optimalno upravljanje kapacitetom bolničkih soba i osoblja. Povećanjem učinkovitosti, kroz postojanje virtualne replike, smanjuje se i vrijeme potrebno za liječenje. Isto tako, virtualno okruženje je sigurno okruženje za provođenje različitih operativnih testiranja u osjetljivom području. Primjer takve prakse je suradnja tvrtke Siemens Healthineers s jednom od najpoznatijih privatnih bolnica u Irskoj, Mater Private Hospital. Nezadovoljni učinkovitosti pružanja zdravstvene skrbi na odjelu radiologije, pristupili su izradi digitalnog blizanca odjela. Kroz digitalnu simulaciju tjeka rada uspjeli su u samo nekoliko tjedana postići traženu optimizaciju usluge i tako poboljšati iskustvo pacijenata.

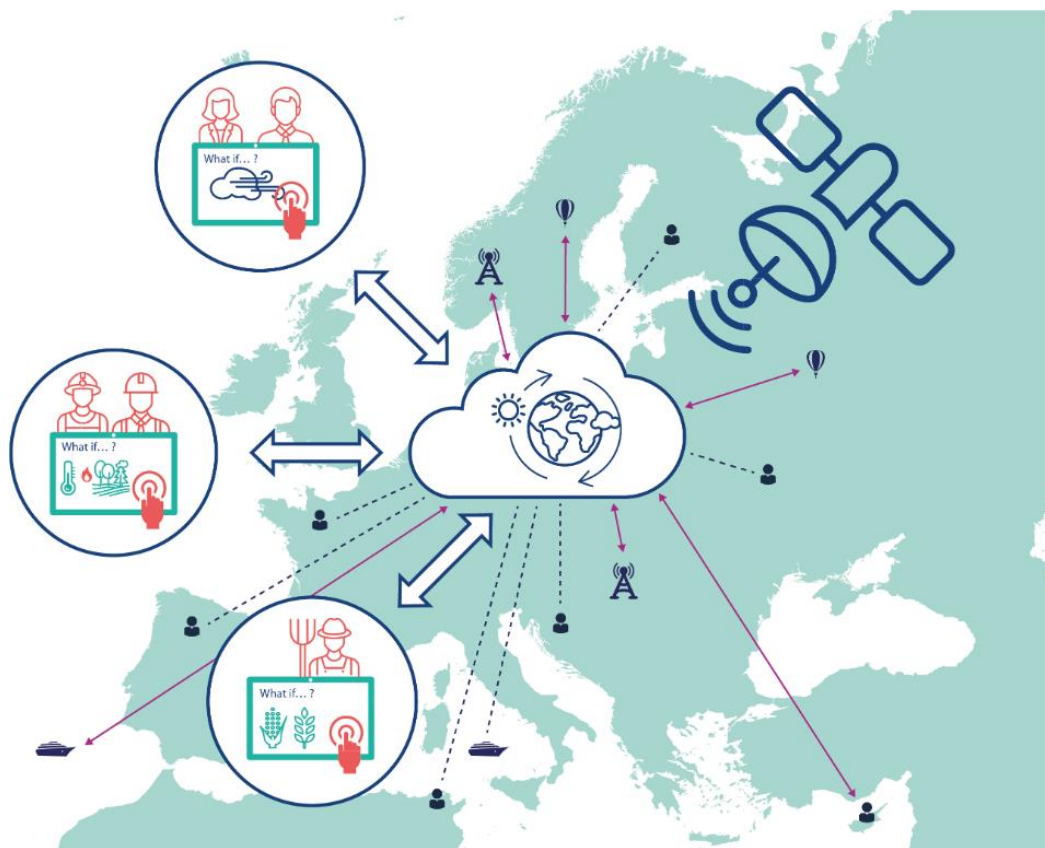
### 3.3.3 Digitalni blizanc Zemlje

Ambiciozni projekt EU Destination Earth DestinE Earth (DestinE) ima za cilj razviti na globalnoj razini visoko precizan digitalni model Zemlje za praćenje i predviđanje interakcije između prirodnih pojava i ljudskih aktivnosti (slika 3.7.). Inicijativa slijedi Digital Strategy Europske komisije i Green Deal ciljeve s naglaskom na klimatske promjene, krčenje šuma i biološku raznolikost (URL 28). U središtu DestinE sustava je digitalni blizanc kompleksnih sustava Zemlje. Takvi sustavi temelje se na integraciji podataka u stvarnom vremenu i prediktivnog modeliranja visoke rezolucije u različitim područjima. Napredni model integrira podatke i snimke satelita za opažanje Zemlje i senzora za prikupljanje podataka u realnom vremenu. Izvedba kompleksnog sustava temelji se na primjeni Big Data koncepta, IoT-a, strojnog učenja, umjetne inteligencije, naprednih algoritama i moćnih unaprijeđenih računala.

Digitalni blizanc Zemlje pomoći će u vizualizaciji, praćenju i predviđanju prirodnih i ljudskih aktivnosti na planetu. Model će moći pratiti zdravlje planeta, izvoditi simulacije Zemljinog međusobno povezanog sustava s ljudskim ponašanjem i potpomagati područje održivog razvoja, čime će podržati europski naponi za bolji okoliš (URL 29). Trenutno su provedena istraživanja mogućnosti primjene na različitim parcijalnim modelima: šume, hidrologija, Antarktika, prehrambeni sustavi, oceani i klimatska žarišta. Pretpostavka izrađenih modela je da budu lako dostupni te kao takvi služe kao podloga donošenju različitih odluka koje su u skladu s održivim politikama Europske unije.

Inicijativu Destination Earth zajedno provode ESA, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) i European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). Predviđanja implementacije projekta su u okviru

sljedećih 7- 10 godina. Početak provođenja planiran je sredinom 2024. godine, a kompletan izrađen digitalni bliznac Zemlje, dinamička virtualna replika našeg planeta koja točno oponaša Zemljino ponašanje, do 2030. godine.



Slika 3.7. Digitalni bliznac Zemlje kao podloga donošenju odluka (URL 28)

S postojećim Copernicus programom te novostvorenom DestinE inicijativom Europa priprema alate, infrastrukturu te podlogu za planiranje i bolje djelovanje u korist budućnosti našeg planeta. Zasiurno, stvara se i atmosfera boljeg razumijevanja uzročno posljedničnih veza djelovanja pojedinca i zajednice na Zemlju.

### 3.4 DIGITALNI BLIZANAC- PREDVIĐANJA ZA BUDUĆNOST

Postavljeni globalni ciljevi održivog razvoja i klimatske neutralnosti dodatno su naglašeni iskustvom pandemije COVID-19. Okruženje današnjice postavlja zahtjeve pronalaska novih načina suočavanja s visoko rizičnim scenarijima. Svojom definicijom tehnologija digitalnog blizanca nudi mogućnosti donošenja odluka temeljenih na pravodobnim informacijama te tako ostvarivanja ekonomskih koristi. Prema MarketsandMarkets istraživanju globalno tržište digitalnog blizanca je 2019. godine iznosilo 3,1 milijardu američkih dolara, a predviđanja su da će do 2026. godine ostvariti vrijednost od 48,2 milijarde američkih dolara (URL 30). Pritom, kao glavni pokretač brzog rasta tržišta ističe se izbijanje pandemije COVID-19 i sve veća potreba za primjenom tehnologije digitalnih blizanca u zdravstvenoj i farmaceutskoj industriji. Nadalje, iskustvo pandemije utjecalo je i na visok rast primjene

digitalnih blizanaca u automobilskoj i transportnoj industriji. Dionici autoindustrije implementiraju digitalna rješenja kako bi umanjili gubitke prouzročene globalnom pandemijom. Značajno je da svi vodeći svjetski proizvođači električnih vozila koriste rješenja digitalnog blizanca, kao i 90% vodećih farmaceutskih i zdravstvenih laboratorija (URL 21). Nadalje, područje energetike i zrakoplovne industrije i dalje će biti jedni od ključnih pokretača primjene i rasta tržišta tehnologije digitalnog blizanca.

Prema istraživanju MarketsandMarkets vodeće svjetske kompanije na tržištu jesu: General Electric (SAD), IBM (SAD), PTC (SAD), Microsoft Corporation (SAD), Siemens AG (Njemačka), ANSYS (SAD), SAP (Njemačka), Oracle (SAD), Robert Bosch (Njemačka) i SWIM.AI (SAD). Većina tvrtki dolazi iz Sjedinjenih Američkih Država (SAD), a Sjeverna Amerika je pritom regija s najvećim udjelom na tržištu digitalnih blizanaca. Konkurencija je velika te značajan broj tvrtki ostvaruje suradnje i partnerstva s drugim tvrtkama koje koriste inovativna rješenja digitalnog blizanca kako bi se održale na tržištu. Primjer je suradnja Bentley Systemsa, Schneider Electrica i Microsofta pri uspostavi digitalnog blizanca ureda Microsofta u Frasers Toweru u Singapuru (URL 31). Putem senzora Schneider Electrica te platformi Bentley Systemsa i Microsofta omogućeno je optimiziranje različitih aspekata prostora za rad te tako smanjenje korištenja energije potičući održivost i ekonomski prosperitet pametnih zgrada. S druge strane, implementacija digitalnog blizanca na veća područja urbanih sredina je u fazi pilot projekata i tek sad dobiva svoj zamah.

Prema ABI Researchu do 2025. godine uspostaviti će se više od 500 digitalnih blizanaca gradova (URL 32). Pritom predviđanja su da se takvom implementacijom mogu postići uštede od 280 milijardi američkih dolara do 2030. godine. Nadalje, primjenom inovativne tehnologije digitalnih blizanaca u urbanom planiranju uštede će se ostvariti kroz područja energije, komunalnih usluga, sigurnosti i unaprijeđenja infrastrukture. ABI Research navodi vodeće pružatelje urbanih rješenja digitalnog blizanca: Siradel, Dassault Systèmes, Siemens, ANSYS, IES, Bentley Systems, Microsoft, AutoDesk, CityZenith i PTV.

CityZenith provodi kampanju Clean Cities- Clean Future kojom potiče transformaciju urbanih sredina u učinkovita, pravovremena, čišća i zdravija mjesta za življenje s nultom emisijom ugljika (URL 33). Cilj kampanje je kroz SmartWorldOS™ urbanu platformu digitalnog blizanca do 2024. godine uspostaviti 100 digitalnih blizanaca gradova s neutralnosti ugljikom. Gradovi koji su se prvi pridružili inicijativi i izradi pilot projekta jesu New York City, Pittsburgh i Phoenix. Na temelju ostvarenih ekoloških i ekonomskih prednosti provedenih projekata, njihov primjer će prepoznati i slijediti drugi gradovi te tako implementirati tehnologiju digitalnih blizanaca za unaprjeđenje urbanih zajednica.

Iako tehnologija digitalnih blizanaca nije još dostigla svoju zrelost, ona je sveprisutna i brzo rastuća u svim navedenim područjima. Stoga, pitanje je trenutka kad će tehnologija u potpunosti zaživjeti svoj puni potencijal na svim razinama. Projekcije različitih istraživanja predviđaju eksponencijalan rast tržišta i daljnje različite primjene. Potrebno je zato pravovremeno iskoristiti mogućnosti digitalnih blizanaca te tako osigurati globalnu konkurentnost i usklađenost s internacionalnim održivim ciljevima.

#### 4. DIGITALNI BLIZANAC NA RAZINI GRADA

Pametni gradovi i planiranje su područja koja doživljavaju značajan porast u implementaciji koncepta digitalnog blizanca. Prema istraživanju ABI Researcha (URL 34) do 2025. godine će biti uspostavljeno više od 500 virtualnih kopija urbanih sredina. Kako je objašnjeno, pametan grad je inicijativa koja integrira podatke i tehnologiju s ciljem bolje kvalitete života građana, održivog razvoja i konačno ostvarivanja ekonomskih koristi. Pritom, Big Data podaci su nedvojbeno pokretači pametnog razvoja (Petrova-Antonova i Ilieva, 2020). IoT tehnologija i Big Data koncept omogućuju provođenje procesa koji se temelje na podacima. No, često su ti podaci u gradskim odjelima izolirani bez semantičke i tehničke poveznice. Potrebna je zajednička urbana platforma koja će se temeljiti na interoperabilnosti podataka s ciljem provođenja različitih analiza i ispitivanja scenarija (slika 4.1.).

Stoga, za uspješno praćenje, upravljanje, modeliranje i odlučivanje potrebno je uspostaviti digitalni blizanac na razini grada. Dok različiti upisnici osiguravaju podatke iz prošlosti, IoT senzori prikupljaju podatke iz sadašnjosti, digitalni blizanac pruža predikciju mogućih događaja iz budućnosti (Ruohomäki i dr., 2018).



Slika 4.1. Koncept digitalnog blizanca na razini grada (Buntak i dr., 2021)

Digitalni blizanac grada može biti uspostavljen za dio grada, pametnu četvrt ili na razini čitavog grada. U svom radu Botín-Sanabria i dr. (2022) ističu kako je rasprostranjenost primjene tehnologije digitalnog blizanca grada najizraženija u Kini i Europi (slika 4.2.). U nastavku su navedeni projekti koji su poslužili kao testno područje za izradu digitalnog blizanca područja cijelog grada.



Slika 4.2. Globalna karta primjene digitalnog blizanca grada (Botín-Sanabria i dr., 2022)

Uspostavljeno virtualno okruženje urbane sredine služi kao simulacijska platforma s nizom različitih primjena. Aplikacije se očituju u području praćenja trenutnog stanja urbanog okruženja, pružanja odgovora u hitnim intervencijama, procjene učinkovitosti, identifikaciji izvora potencijalnih rizika te predviđanju razvoja situacija s obzirom na povijesne podatke (Ivanov i dr., 2020). Konkretnije, digitalni blizanac može pomoći u kontroliranom gospodarenju otpadom, smanjenju onečišćenja provođenjem analiza okoliša, inteligentnom transportu upravljajući semaforima te racionalnijoj potrošnji energije kontrolirajući pametnu javnu rasvjetu. Zatim, virtualna kopija grada pridonosi sigurnijem javnom prostoru, upravljanju parkirnim mjestima, dostupnijim gradskim uslugama te tako poboljšanoj kvaliteti života građana.

Napretkom tehnologije i prikupljanjem podataka iz različitih izvora u gotovo svakom trenutku otvoren je put za daljnje razvijanje pametnih rješenja. Podaci o prometu, podaci senzora koji prikupljaju u realnom vremenu, kamere čiji podaci služe za složene analize, različiti otvoreni podaci su ključni pri osiguravanju učinkovitosti digitalne kopije grada. Prema Ivanov i dr. (2020), informacijska struktura digitalnog blizanca grada sastoji se od senzora koji prikupljaju podatke, mreže koja te podatke prenosi, softverskih sustava za čišćenje podataka i softvera za inteligentne analize podataka. Senzori omogućuju interakciju virtualnog i stvarnog svijeta. Dok, koristeći snagu strojnog učenja, umjetne inteligencije i drugih naprednih algoritama stvaraju se preduvjeti za donošenje odluka koje svoju svrhu pronalaze u stvarnom svijetu. Digitalizacija gradova je zato omogućena sve većom dostupnošću podataka, povećanom računalnom snagom i primjenom umjetne inteligencije.

## 4.1 METODOLOGIJA USPOSTAVE DIGITALNOG BLIZANCA GRADA

Povezivanje senzorskih podataka visoke interoperabilnosti s virtualnim modelom grada čini bazu digitalnog blizanca. Pritom, City Information Model (CIM) je okvir digitalnog blizanca grada, osnovica koja omogućuje agregaciju podataka prikupljenih iz različitih izvora. Petrova-Antonova i Ilieva (2021) u svom radu iznose metodološki okvir za uspostavu inteligentnog modela grada koji se temelji na konceptu digitalnog blizanca. Metodologija se sastoji od šest koraka:

- formiranje,
- interakcija,
- agregacija,
- analiza,
- uvid,
- donošenje odluka.

Kreiranje CIM-a temelji se na prikupljenim podacima iz baza podataka različitih organizacijskih struktura, senzora i kamera. Takvi podaci se dijele u dvije skupine. Prvo, podaci koji su povezani s okruženjem u kojem grad djeluje te podaci proizašli iz gradskih procesa. Oni mogu biti nadopunjeni dodatnim podacima uspostavljenih GIS sustava, gradskih poduzeća i ostalih sustava kojima upravlja gradska vlast. Komunikacija prikupljenih podataka stvarnog svijeta i virtualnog modela je dvosmjerna. Komunikacijska infrastruktura omogućuje prijenos podataka na platformu za simulacije, a samo sučelje za prijenos podataka ovisi o nizu parametara. Prije svega, o vrsti komunikacijske mreže. Nadalje, strukturirani prikupljeni podaci se primarno obrađuju filtriranjem i čišćenjem te zatim se agregiraju u spremišta podataka.

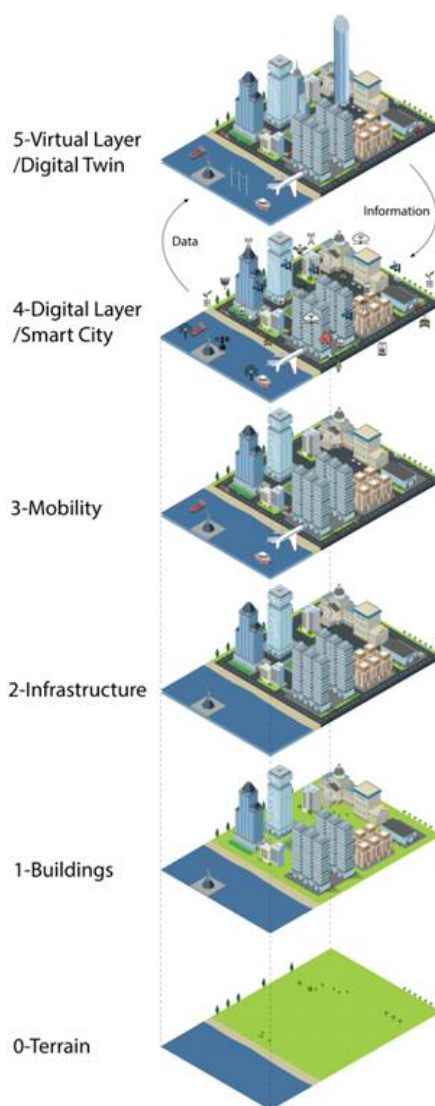
Faza analize se temelji na različitim virtualnim modelima koji su izgrađeni na okosnici CIM-a. Analize su preduvjet za dobivanje uvida i pokretanje različitih procesa vođenih umjetnom inteligencijom te kao takvi su podloga za donošenje odluka. Uvidi u provedene analize se temelje na višedimenzionalnom prikazu. Upravo se kroz 3D i 4D vizualizacije gradskih sredina mogu najbolje shvatiti analitike urbanih procesa. Konačno, uspostava inteligentnog modela grada temelji se na donošenju odluka koje proizlaze iz dobivenih zaključaka provedenih analiza. Odluke koje su utemeljene na inovativnim pristupima korak su ka novim procesima i akcijama sa svrhom boljeg prosperiteta urbane zajednice.

## 4.2 VIŠESLOJNA STRUKTURA DIGITALNOG BLIZANCA GRADA

Digitalni blizanac grada sastoji se od niza slojeva koji se nadovezuju jedan na drugi. White i dr. (2021) definiraju šest slojeva koji sačinjavaju virtualni model pametnog grada. Prvih pet slojeva koji su nanizani jedan iznad drugog sadrže informacije o terenu, zgradama, infrastrukturi grada, mobilnosti te povezanim IoT uređajima. Digitalni sloj pametnog grada prikuplja generirane podatke koje onda prenosi virtualnom sloju, digitalnom blizancu grada, prikazanom na slici 4.3. Digitalni blizanac na temelju prikupljenih podataka izvodi različite simulacije, analize, optimizacije i predikcije. Zatim se dobivene informacije iz virtualnog sloja prenose u druge slojeve gdje se primjenjuju u stvarnom svijetu.

Nulti sloj sadrži osnovne informacije o terenu, strmim uzvisinama, rijekama, vrsti tla i drugo. Nadalje, sloj zgrade sadrži sve zgrade sastavljene od visoko preciznog Building Information

Modelinga (BIM). Pritom, zgrade se također mogu generirati pomoću stereo parova aerofotogrametrijskih snimaka. Struktura se odnosi na osnovne organizacijske strukture i objekte koje okružuju zgrade kao što su ceste, telekomunikacijski vodovi i dr. Takvi podaci su dostupni dijelom na Open Street Mapu (OSM), a mogu se generirati i kroz 3D mapiranje. Treći sloj virtualnog modela čini mobilnost koja uključuje kretanje ljudi, ali i dobara. Digitalni sloj pametnog grada prikuplja velike količine podataka, prvenstveno zahvaljujući sve većoj implementaciji IoT uređaja. Isto tako, dodatni izvor podataka su građani te senzori za prikupljanje. Pritom, digitalni sloj je automatski povezan s posljednjim slojem, digitalnim blizancem. Virtualni model je stoga platforma za provođenje simulacija i dubinskih urbanih analiza s ciljem pozitivnog djelovanja na zajednicu.



Slika 4.3. Višeslojna struktura digitalnog blizanca grada (White i dr., 2021)

### 4.3 IZAZOVI PRI USPOSTAVI DIGITALNOG BLIZANCA GRADA

Trenutni izazovi uspostave digitalnog blizanca urbane razine u većoj se mjeri odnose na nadilaženje različitih organizacijskih prepreka i osiguravanje otvorenog pristupa informacija za sve zainteresirane gradske dionike. Naime, kako bi digitalni blizanac ostvario svoj puni potencijal posljednji korak u implementaciji je stvaranje web platforme koja će omogućiti građanima praćenje gradskih procesa. Osim uvida u planirane politike grada, platforma omogućuje povratnu informaciju građana te tako stvara nove podatke koji se vraćaju u integrirani model. Sve više tvrtki pokazuje inicijativu djelovanja u procesu stvaranja digitalnog blizanca urbane sredine. No, većina privatnih tvrtki svoje krajnje produkte osigurava licencama te su tako stvoreni virtualni modeli javno nedostupni. Zsigurno, ukoliko konačni modeli nisu dostupni svim gradskim dionicima, utoliko se smanjuje učinak povratnih podataka koji služe kao smjernica u daljnjem donošenju odluka. Uključivanjem svih dionika u proces stvaranja digitalnog blizanca otvaraju se nove mogućnosti i društveni aspekti. Nadalje, testni projekti uspostave digitalnih blizanaca za određena područja gradova naglašavaju upravo koncept otvorenih podataka kao smjernicu koja donosi značajne prednosti.

S druge strane, javlja se izazov uspostave urbane platforme koja se temelji na prostornim informacijama od kojih se neke sigurno odnose na osobne podatke. Sukladno definiciji „osobni podaci su svi podaci koji se odnose na pojedinca čiji je identitet utvrđen ili se može utvrditi („ispitanik”); pojedinac čiji se identitet može utvrditi jest osoba koja se može identificirati izravno ili neizravno, osobito uz pomoć identifikatora kao što su ime, identifikacijski broj, podaci o lokaciji, mrežni identifikator ili uz pomoć jednog ili više čimbenika svojstvenih za fizički, fiziološki, genetski, mentalni, ekonomski, kulturni ili socijalni identitet tog pojedinca“.

Pritom, u središtu koncepta pametnog grada jesu lokacija i informacije koje su georeferencirane. Kako su informacije o lokaciji uključene, različite aplikacije virtualnog dvojnika mogu uključivati obradu osobnih podataka. Stoga, mora se naći primjeren način kako se osjetljivi podaci u okviru javnih platformi obrađuju zakonito i transparentno u odnosu na nositelja podataka (Ruohomäki i dr., 2018). Podatke je potrebno ograničiti na one koji su relevantni za određenu upotrebu. Isto tako, potrebno je u odluku koje se informacije i u koju svrhu mogu upotrijebiti uključiti nositelje podataka. Tako se stvara javna gradska platforma koja potiče građane na dijeljenje podataka s ostvarivanjem viših ciljeva.

Ograničavanjem seta podataka stvaraju se podaci koji su nekonzistentni. Stoga, potrebni su podaci koji ne sadrže šumove i koji su visokokvalitetni. Nedsljedni podaci mogu dovesti do smanjenih performansi uspostavljenog digitalnog blizanca. Bez visokokvalitetnih podataka na mikrorazinama provođenje optimizacija i donošenja odluka je otežano. No, za olakšano upravljanje i generiranje informacija mogu se koristiti napredni mehanizmi prikupljanja. Isto tako, tehnologija digitalnih blizanaca je u fazi razvoja. Unatoč velikom broju stvorenih virtualnih modela, još uvijek nedostaje znanja i vještina pri optimizaciji i analizi podataka te usklađivanju interoperabilnosti dionika koji sudjeluju (Zhang i dr., 2021).

## 4.4 DIGITALNI BLIZANCI GRADOVA U SVIJETU

Sve više gradova okreće se konceptu pametnog grada te korištenju inovativnih tehnologija za uspostavu virtualne kopije gradskih sredina. Različita istraživanja ukazuju na nagli skok tržišta te eksponencijalan rast dionika u okviru stvaranja digitalnog blizanca grada. Pretraživanjem uspostavljenih digitalnih dvojnika nameću se začetnici primjene. To je Singapore, na svjetskoj razini te Helsinki, na europskoj razini. U nastavku su predstavljeni projekti lokalnih vlasti te primjene tako uspostavljenih digitalnih dvojnika.

### 4.4.1 Digitalni blizanac Singapura

Projekt vrijedan 73 milijuna dolara Virtual Singapore pokrenut je 2014. godine. Inicijativa je nastala suradnjom National Research Foundationa i Singapore Land Authorityja te vladinih agencija s francuskom softverskom tvrtkom Dassault Systèmes. Virtual Singapore, prikazan na slici 4.4., predstavlja 3D digitalnu repliku Singapura izgrađenu na temelju topografskih podataka i dinamičkih podataka prikupljenih u stvarnom vremenu (URL 35). Takva platforma može poslužiti građanima, javnom sektoru, privatnim tvrtkama te istraživačkim skupinama u kreiranju, testiranju, planiranju te donošenju odluka za rješavanje izazova složene urbane sredine kao što je Singapur.

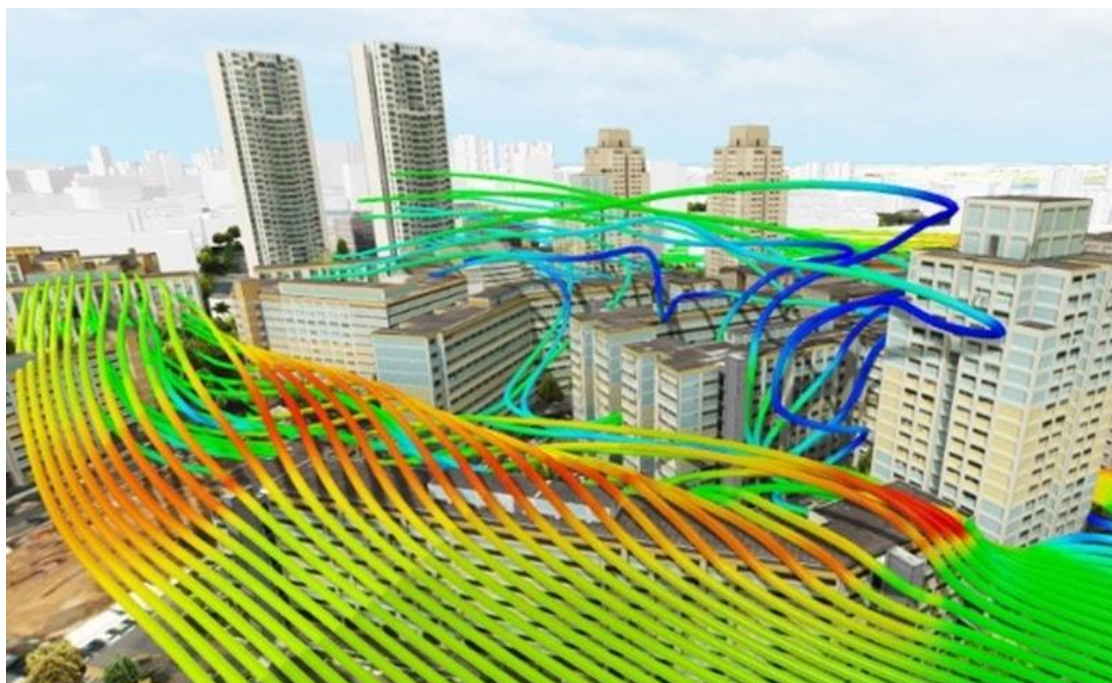
Semantički 3D model koji je okosnica digitalnog blizanca temelji se na vektorskim i rasterskim podacima prikupljenim iz različitih vladinih agencija te više izvora podataka čijom kombinacijom se može dobiti vjerodostojan prikaz stvarnosti. Projekt je podijeljen u dvije faze. U prvom dijelu, provedeno je snimanje iz zraka koristeći LiDAR tehnologiju i aerofotogrametriju. U drugom dijelu provedbe, snimke iz zraka nadopunjene su mobilnim kartiranjem laserskim skeniranjem čime se povećala detaljnost digitalnog modela. Kako bi model imao svojstvo ažuriranosti, potrebni su i podaci u stvarnom vremenu. Stoga, u prikupljanje je nužno integrirati i informacije koje su dio IoT tehnologije.



Slika 4.4. Isječak platforme digitalnog blizanca Singapura (URL 35)

Ističu se četiri glavne mogućnosti korištenja digitalnog blizanca Singapura. Prvo, omogućeno je provođenje eksperimentiranja i testiranja karakteristika u virtualnom okruženju. Sljedeće, temeljen na velikoj količini podataka, Virtual Singapore je integrirana platforma koja pomaže u planiranju i donošenju odluka. Isto tako, virtualno okruženje predstavlja podlogu za raznovrsna istraživanja te razvoj novih aplikacija. Stoga, integrirana podatkovna platforma je ključna za provođenje inicijativa vlasti. Nadalje, pružanjem informacija dolazi do bolje informiranosti i olakšane povezivosti usluga i građana. U virtualnom kontekstu privatni sektor ostvaruje koristi kroz bolje upravljanje, iskorištavanje resursa te provođenje specijaliziranih usluga. Zaključno, koncept je još uvijek u nastajanju te pruža mogućnosti razvoja alata za suradnju, testiranje i provođenje složenih analiza.

Tako uspostavljen virtualni model dinamičkog grada ima ogroman potencijal i neograničene primjene koje svakodnevno nalaze svoju podlogu (slika 4.5.). Primjerice, u okviru uspostave Virtual Singaporea odabrano je testno područje Yuhua okruga za provođenje Greenprint inicijative vladine agencije. Greenprint inicijativa integrira strategije i ciljeve za provođenje *going green* politike te stvaranje održivih kućanstava (URL 36). Naglasak projekta je na razvoju energetske učinkovitosti, boljeg gospodarenja resursima i otpadom. Na testnom području ispituju se prednosti postavljanja solarnih panela, upotrebe pametne LED rasvjete, pneumatskih sustava za transport otpada te mrežne povezivosti pješačkih i biciklističkih staza. U kontekstu urbanog planiranja javljaju se mnoge prednosti uspostave digitalnog dvojnika. Primjerice, omogućeni su vremenski prikazi mijenjanja temperature i sunčeve svjetlosti na specifičnom području. Isto tako, moguće je ispitivati utjecaj zelenih krovova na okoliš. Nadalje, izradom toplinskih karata i karata buke moguće je modelirati okruženje. Pritom, poluautomatsko planiranje značajno olakšava prvođenje pojedinih inicijativa pa tako i Greenprint inicijative.



Slika 4.5. Virtualni Singapur kao podloga za ispitivanje utjecaja vjeta (URL 37)

Stoga, digitalni dvojnik koji se temelji na velikoj količini podataka može poslužiti za različite analize. U kontekstu održivosti, postoje podaci o površini krovova, visini zgrada i količini sunčeve svjetlosti. Na temelju određenih parametara provodi se filtriranje zgrada prikladnih za ugradnju solarnih panela. Osim analiziranja potencijala zgrada za ugradnju panela, može se izračunati i koliko energije se može proizvesti u određenom danu. Zasiurno da takve projekcije omogućuju stvaranje pozitivnije okoline za život, te posljedično, jednako važno, uštede i smanjenje troškova.

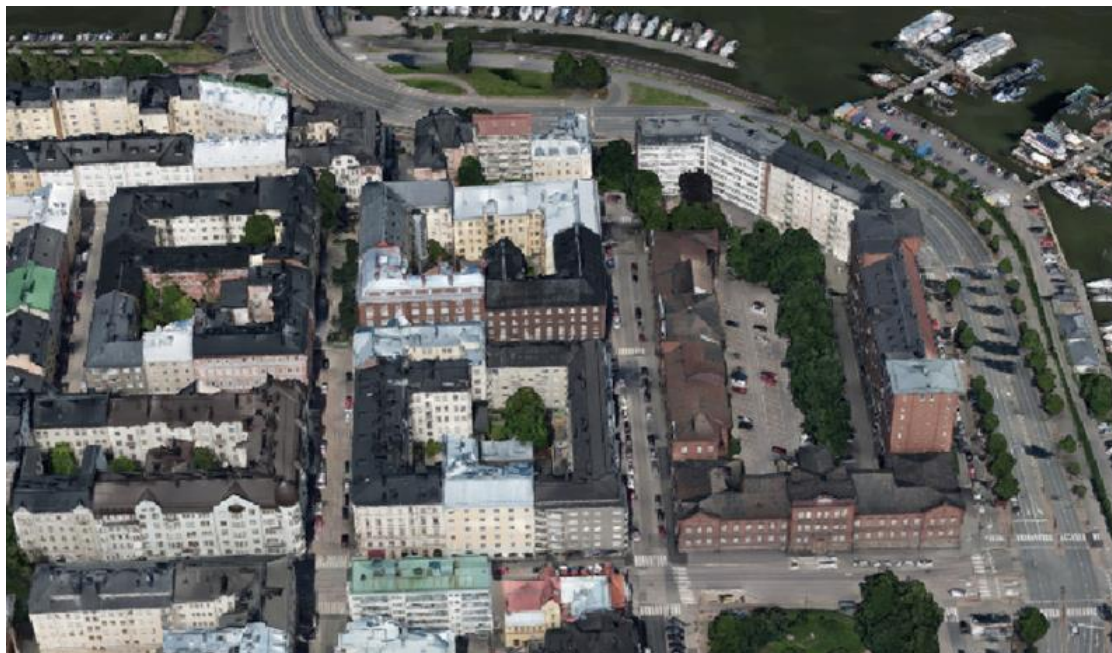
#### 4.4.2 Digitalni blizanac okruga Kalasatame u Helsinkiju

Pretraživanjem dostupnih izvora, na europskom tlu se kao predvodnik uvođenja pametnih rješenja izdvaja grad Helsinki. Jedno od inovativnih pristupa je i provođenje pilot projekta Kalasatama Digital Twins Project. Osnovni cilj projekta dovršenog 2019. godine bio je uspostaviti digitalni blizanac okruga Kalasatame. Testno područje je poslužilo za ispitivanje provođenja pametnih inicijativa, korištenja otvorenih podataka, 3D modeliranja i energetske učinkovitosti.

Pritom, Smart Kalasatama je naziv za inovativnu ambicioznu platformu koja osim izrade digitalnog blizanca okruga Kalasatame provodi još dvadesetak inovativnih projekata (URL 38). Pametne inicijative usmjerene su ka poboljšanju gradskih usluga i infrastrukture. Unaprjeđenjem svakodnevnih usluga, cilj projekta je svakom građaninu uštedjeti 1 sat slobodnog vremena dnevno. Isto tako, Smart Kalasatama razvija pristupe korištenja čiste energije i neutralnosti ugljikom. Zelena rješenja se ostvaruju kroz upotrebu pametnih mreža, izgradnju solarnih elektrana te električnih vozila.

Stečena iskustva pilot projekta digitalnog blizanca neupitno će poslužiti pri izradi virtualne kopije čitavog grada s većom dostupnošću digitalnih usluga te postizanju cilja neutralnosti ugljikom do 2035. godine. Izrađeni model služi kao platforma za dizajniranje, testiranje, urbano planiranje te razvoj novih pristupa i procesa koji se temelje na 3D tehnologiji, a sa svrhom razvoja pametnog grada. Pri izradi digitalnog blizanca stavljen je naglasak na otvorenim podacima. Isto tako, sama ideja uspostave virtualne kopije okruga Kalasatame uključivala je zajedničko sudjelovanje, kako stručnjaka, tako i građana te lokalne uprave.

Digitalni blizanac područja Kalasatame razvijao se u 2 smjera. Prvo, razvijen je visoko kvalitetan semantički informacijski model temeljen na CityGML standardu. Sljedeće, uspostavljen je digitalni blizanac kao *reality mesh* model prikazan na slici 4.6. *Reality mesh* model je fotorealistični model grada koji stvara vizualni geometrijski model te odgovara stvarnom stanju na temelju zračnih snimaka (URL 39). Ulazni podaci za izradu oba modela temeljili su se prvenstveno na zračnim snimkama i setovima oblaka točaka (aerofotogrametrija i lasersko skeniranje), različitim upisnicima i ostalim prostornim podacima. Za izradu mrežastog prikaza grada korišten je softver Context Capture tvrtke Bentley Systems te računala sa snažnim performansama. Prvo, potrebno je bilo obraditi ulazne podatke. Zatim, provesti automatsku triangulaciju te konačno, izračunati model koristeći odabrani softver. Kod kreiranja semantičkog informacijskog modela poslužili su vektorski podaci zgrada s osnovne karte, oblaci točaka dobiveni laserskim skeniranjem te pridruženi atributni podaci iz službenih upisnika (slika 4.7.).



*Slika 4.6. Isječak reality mesh modela Kalasatame (URL 40)*

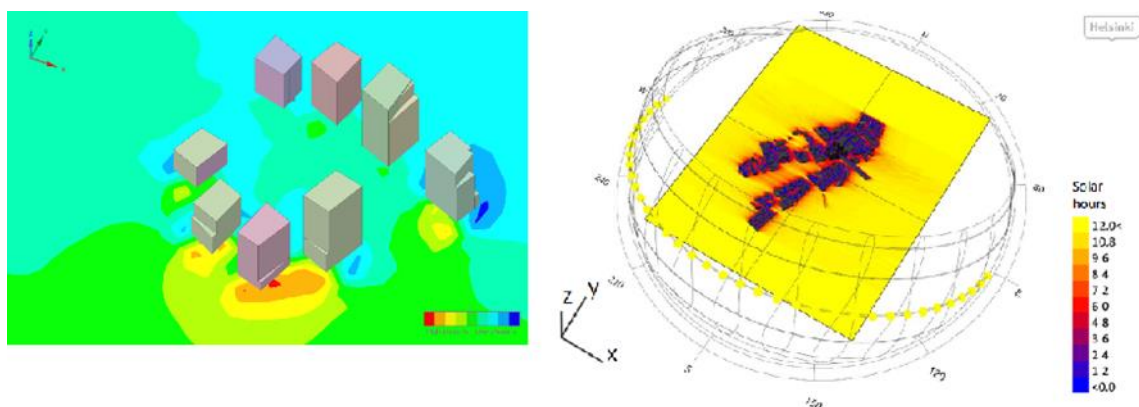
3D modeliranje zgrada provedeno je na temelju poligona otisaka, digitalnog modela reljefa i digitalnog modela površina. Korištena je BuildingReconstruction aplikacija. U softver su uvezeni vektorski otisci, s digitalnim modelom reljefa (DMR) i digitalnim modelom površina. Zatim, poligoni zgrada su postavljeni na DMR, a digitalni model površine je poslužio kao okosnica 3D modela zgrada. U model je uveden i oblak točaka kako bi se utvrdila odstupanja te potreba za potencijalnim ručnim dorađivanjem.



*Slika 4.7. Isječak web prikaza 3D informacijskog modela Kalasatame (URL 41)*

Oba stvorena modela digitalnog blizanca, mrežni i semantički prikaz, su javno dostupna. Jedan od ciljeva uspostave pilot projekta uključivao je razmatranje utjecaja korištenja otvorenih podataka na urbanu zajednicu. Kroz pružanje visoko kvalitetnih virtualnih kopija, otvaraju se nebrojene prednosti kako obrazovnih institucija, privatnih tvrtki i društva u cjelini. Komunikacija s dionicima ostvarena je kroz web platformu OpenCities Plannera, tvrtke Bentley Systems. Platforma omogućuje vizualizaciju svih sadašnjih i budućih *smart city* rješenja koji se provode. Aplikacija je jednostavno pristupačna, olakšano je sudjelovanje građana u vizualnom okruženju pristupom putem mobilnih uređaja. Tako je ostvarena bolja transparentnost, poboljšani odnosi s javnošću te testno područje za širu primjenu.

Konačno, digitalni blizanac okruga Kalasatame poslužio je kao simulacijska platforma za različita ispitivanja (slika 4.8.). Primjerice, moguće je ispitivati utjecaje vjetera za trenutno stanje, kao i za buduće planove. Isto tako, digitalni blizanac omogućuje provođenje simulacija utjecaja sunčeve svjetlosti. Kroz projekt je ispitan solarni potencijal i analiza sunčevih sjena. Kao takav, kvalitetni urbani model je platforma koja služi kao podrška u odlučivanju i postepenom, dugoročnom održivom razvoju.



Slika 4.8. Digitalni blizanac kao simulacijska platforma za utjecaje vjetera i sunca (URL 39)

## 5. ULOGA DIGITALNOG BLIZANCA U ODRŽIVOM RAZVOJU

Uz spomenutu urbanizaciju, svjedoci smo niza negativnih trendova utjecaja postojećeg načina življenja ljudi na okoliš. Globalno zatopljenje, izumiranje životinjskih vrsti, nedostatak resursa samo su neke od posljedica. Ne poduzimajući ključne korake u sprječavanju daljnje degradacije okoliša postoji opasnost od nagle nelinearne promjene na globalnoj razini. Gradovi, sredine s najvećom koncentracijom ljudi i djelovanja nameću se kao glavni generatori takvih negativnih posljedica. Pritom, zgrade koje predstavljaju centar svakodnevnog života jesu u središtu negativnog učinka. Naime, zgrade su odgovorne za 40% globalne potrošnje energije i ukupno 36% emisije stakleničkih plinova (URL 42). Uspostavljanje energetske učinkovitosti zgrada pokretačka je snaga postizanja cilja European Green Deal neutralnosti ugljikom do 2050. godine. Klimatski akcijski plan EU s naglaskom na održivu ekonomiju u suglasnosti je s UN Sustainable Development Goals do 2030. godine. Za savladavanje globalnih društvenih i ekoloških izazova potrebno je pametno planiranje i upravljanje gradovima. Pritom, urbane sredine postaju sigurnije, otpornije i održivije samo ako se odluke temelje na informacijama koje su relevantne.

Za postizanje navedenih ciljeva nužno je primjenjivanje novih digitalnih tehnologija. Pametna tehnologija igra ključnu ulogu u postizanju razvojnih ciljeva održivosti gradova i zajednica. Pritom, digitalni blizanci se nameću kao jedan od vodećih inovativnih tehnoloških trendova. Iako je potpuna implementacija u razvojnoj fazi, tehnologija digitalnih blizanaca pridonosi ubrzanju postizanja UN-ovih ciljeva održivog razvoja. Naime, gradovi predstavljaju idealno testno područje za primjenu digitalnih blizanaca pokazujući tako svim ostalim sektorima prednosti i mogućnosti ostvarivanja održivih ciljeva. Koristeći isprobano i dostupnu tehnologiju digitalnih blizanaca potrošnja energije zgrada, može se smanjiti za 30- 80% (URL 21).

### 5.1 USPOSTAVA ENERGETSKI UČINKOVITIH ČETVRTI

U skladu s europskim klimatskim i energetske ciljevima razvijen je Strategic Energy Technology Plan (SET Plan) koji ima vodeću ulogu pri postizanju klimatske neutralnosti do 2050. godine. U okviru SET Plana dosad je razvijeno 14 radnih skupina između kojih je i Positive Energy Districts (PED) koja podržava planiranje, implementaciju i replikaciju 100 okruga s pozitivnom energetske bilancom na području 20 članica EU (URL 43). Okruzi i susjedstva s pozitivnom energetske bilancom jesu sveobuhvatni pristupi prema održivoj urbanizaciji kroz energetske učinkovitost, energetske fleksibilnost i energetske proizvodnju. Tako uspostavljena urbana područja proizvode neto nulte emisije stakleničkih plinova i aktivno upravljaju viškom proizvedene obnovljive energije. Nadalje, zahtijevaju integraciju različitih sustava te interakciju između zgrada, sudionika, energetske sustava, mobilnosti i ICT-a. Pritom, tehnologija digitalnih blizanaca može pomoći integraciji podataka iz različitih izvora, razumijevanju međuovisnosti te putem vizualizacije, složenih analiza poslužiti kao podloga donošenju odluka.

Digitalni blizanci na više razina pridonose stvaranju područja sa smanjenom potrošnjom energije i emisijom ugljika stvarajući platformu za optimizaciju PED-a. Na osnovu podataka međuovisnih sektora koji definiraju gradsko područje uspostavlja se virtualna kopija. Senzori omogućuju prikupljanje različitih informacija o temperaturi, vlazi, potrošnji energije, emisiji ugljika, proizvodnji energije iz obnovljivih izvora, itd. Stvoreni digitalni

model koji sadrži sve energetske povezane informacije može poslužiti za izvođenje simulacija i predikcija scenarija temeljenih na različitim pristupima gospodarenja energijom i smanjenju emisija. Isto tako, stvaranjem digitalnog blizanca za potrebe uspostave PED-a moguće je sagledati troškove i doprinose provođenja različitih inicijativa energetske učinkovitosti u cjelini. Između ostaloga, mogu se ispitivati utjecaji ugradnje solarnih panela na krovove zgrada te postavljanja električnih punionica na pouzdanost mreže. Primjerice, u okviru PED-a uspostavljen je projekt +Cityxchange, gradovi koji razvijaju pozitivne energetske blokove upotrebom pametnih digitalnih rješenja. U inicijativi sudjeluje sedam europskih gradova s naglaskom na poboljšanje kvalitete života građana i stvaranje blokova povezanih zgrada koje generiraju više energije nego što potroše. Dugoročni ciljevi gradova koji sudjeluju u inicijativi jesu uspostava održivih eko sustava s nultom stopom emisija ugljika i 100 postotnih energetske obnovljivih regija do 2050. godine.

## 5.2 GRAD PULA- PAMETAN GRAD

Posljednjih nekoliko godina grad Pula provodi niz projekata koji su u skladu s najnovijim *smart city* trendovima. Pula je 2020. godine proglašena među 5 najboljih pametnih gradova u Hrvatskoj prema istraživanju Jutarnjeg lista, portala Gradonačelnik.hr i konzultantske tvrtke Apsolon (URL 44). Istraživanje je temeljeno na 6 tematskih *smart city* cjelina koje uključuju digitalnu spremnost uprave, strateško usmjerenje grada kao pametnog, pametno gospodarstvo, pametno društvo, pametnu infrastrukturu i pametan okoliš. Posebice, Pula se ističe prema udjelu stanovništva povezanog na sustav pročišćavanja odvodnih voda, indeksu digitalne spremne uprave, broju programa visokog obrazovanja u ICT-u, udjelu zaposlenih u djelatnostima koje se odnose na ICT, kreativnu industriju te istraživanje i razvoj. Isto tako, Pula je jedan od pionira uvođenja elektroničkog poslovanja te uspostavi aplikacija za upis djece u vrtić, online plaćanje računa te transparentnost proračuna. Zatim, kreirana je aplikacija Smart Pula-Pola koja omogućuje direktnu komunikaciju s građanima postavljanjem prijedloga ili iznošenjem problema stvarajući tako pozitivnu klimu između građana i gradskih službi.

Sljedeće, 2021. godine je pokrenut projekt Urbani vrtovi Pule čime se potiče održavanje zelenih oaza u urbanim područjima u korak s drugim europskim pametnim rješenjima. Nadalje, gradska uprava ističe planove razvoja Pule kao pametnog, zelenog i transparentnog grada. Zatim, najavljena je opskrba električnim vozilom za ugostiteljske objekte u pješačkoj zoni, kao i uspostava Park and Ride parkirališta koja potiču korištenje javnog prijevoza, a smanjuju udio vozila u samom centru grada (URL 45). Isto tako, u ožujku 2022. godine pokrenut je projekt izrade dokumentacije za solarizaciju krovova javnih zgrada Grada Pule. Tehnička podrška izrade povjerena je Regionalnoj energetskej agenciji Sjeverozapadne Hrvatske (REGEA) (URL 46). Provedbom projekta dobit će se uvid u potencijal pojedinih zgrada za ugradnju solarnih panela, kao i mogući učinci ušteda, ali i usklađenost s europskim politikama klimatske neutralnosti.

### 5.3 SPECIFIČNA PROBLEMATIKA

Za uspješno provođenje inovativnih pristupa nužna je suradnja gradskih dionika. Konkretno, uspostava digitalnih dvojnika urbanih sredina zahtjeva suradnju gradskih vlasti te stručnjaka za urbana rješenja. Gradska uprava raspolaže potrebnim informacijama i podacima, dok stručnjaci provode digitalna rješenja kao potpora gradskom odlučivanju.

U okviru ovog rada uspostavljena je suradnja s Gradom Pulum, točnije tri odjela. Prvo, suradnja s Upravnim odjelom za lokalnu samoupravu, gdje su konkretizirani specifični razvojni projekti koji se provode u okviru *smart city* solucija. Nadalje, Upravni odjel za komunalni sustav i upravljanje imovinom osigurao je podatke u digitalnom obliku koji su poslužili za svrhu izrade diplomskog rada. Isto tako, putem Upravnog odjela za prostorno planiranje i zaštitu okoliša definirana je tematika rada. Naime, predstavljen je Nacrt Akcijskog plana energetske učinkovitosti Grada Pule za period od 2022. do 2024. godine temeljen kojega je odabrano testno područje i problematika uspostave digitalnog dvojnika za testno područje.

Na osnovu strateških dokumenata energetske učinkovitosti i korištenja obnovljivih izvora energije koji se razvijaju na nacionalnoj razini, u svibnju 2022. godine donesen je Nacrt Akcijskog plana energetske učinkovitosti Grada Pule za period od 2022. do 2024. godine. Nacrt je izradila Istarska regionalna energetska agencija. Akcijski plan sastoji se od analiza potrošnje energije u 3 odvojene cjeline: zgradarstvo- zgrade javne namjene, javna rasvjeta i promet u službi Grada te povezanih trgovačkih društava (URL 47). Isto tako, navedene su i planirane mjere energetske učinkovitosti za ostvarivanje ciljeva u razdoblju od 2022. do 2024. godine. Pritom, na temelju provedene analize prema ukupnoj potrošnji energije ističe se objekt Dom sportova Mate Parlov, a električna energija kao primarna vrsta korištenog energenta. Zatim, prema provedenoj analizi potrošnje u javnoj rasvjeti dolazi se do zaključka kako je većina svjetiljki zastarjela te koristi znatno više energije u odnosu na moderna rješenja. Isto tako, godišnji rad pojedine svjetiljke iznosi 4100 sati. Kao jedna od mjera energetske učinkovitosti ističe se ugradnja fotonaponskih sustava na krov Doma sportova Mate Parlov na adresi Trg Kralja Tomislava 7 u Puli.

Nadalje, Grad Pula potiče ugradnju solarnih panela i na obiteljske kuće kroz sufinanciranje projektne dokumentacije i instalacije fotonaponskih sustava. Isto tako, sufinanciranjem kupnje električnih bicikala stavlja se naglasak općenito na elektromobilnost te smanjenje potrošnje energije u prometu te smanjenje emisije stakleničkih plinova. Zatim, kroz mjeru modernizacije javne rasvjete nastoje se optimizirati ekonomski i ekološki negativni učinci. Zamjenom postojećih rasvjetnih tijela prihvatljivijom LED rasvjetom omogućit će se upravljanje rasvjetnim tijelima i posljedično smanjenje potrošnje energije te ostvarivanje ekonomskih koristi.

## 6. USPOSTAVA DIGITALNOG BLIZANCA

U poglavlju je prikazan metodološki okvir uspostave 3D informacijskog modela testnog područja. Visokokvalitetni digitalni modeli urbanih područja temelj su za razvoj digitalnih blizanaca gradova. Cilj zadatka je kroz metodologiju uspostave virtualnih kopija urbanih sredina ukazati gradskim vlastima na moguće primjene digitalnih blizanaca u gradskim procesima. I to kroz dizajniranje, testiranje, optimiziranje te urbano planiranje. Razvoj 3D modela temeljen je na podacima koje su osigurali Grad Pula, Upravni odjel za komunalni sustav i upravljanje imovinom te Državna geodetska uprava (Tablica 6.1.).

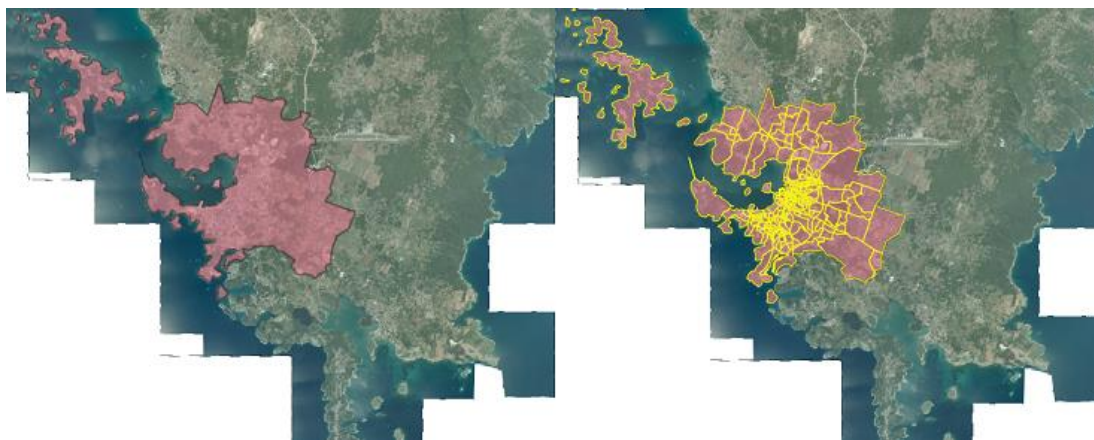
Tablica 6.1 Podaci prikupljeni za potrebe izrade rada

Naziv	Tip datoteke	Opis	Izvor
prostorna podjela	.shp	poligoni popisnih krugova s jedinstvenom identifikacijskom oznakom	Grad Pula
aerofotogrametrijski snimci	.tiff	zračni snimak M 1:2000	DGU
DMR	.dwg	točke na određenoj udaljenosti s pridruženim visinama reljefa	DGU
zgrade	.shp	poligoni zgrada s pridruženim atributnim informacijama: kućni broj, ulica, stanje..	Grad Pula
ceste	.shp	linije projicirane kroz središnju os cesta s pridruženim nazivom	Grad Pula
javna rasvjeta	.shp	točke lokacija rasvjetnih tijela	Grad Pula
javna rasvjeta	.xlsx	tablica postojećeg stanja rasvjetnih tijela s informacijama o visini, tipu, stanju svjetiljki..	Grad Pula

Početno, definirano je testno područje te sukladno tome svi podaci su svedeni na granice prostora obuhvata. Zatim, na temelju aerofotogrametrijskih snimaka izrađen je digitalni model površine te ortomozaik. Isto tako, provedena je interpolacija dobivenog DMR-a. Rasterska operacija razlike dvaju stvorenih rastera, digitalnog modela površine i DMR-a, ključna je za dobivanje apsolutnih visina zgrada sloja normalized Digital Surface Model (nDSM). Sljedeći korak uključuje obradu prikupljenih vektorskih podataka zgrada, cesta te javne rasvjete. Konačno, 3D modeliranje provedeno je koristeći napredne algoritme odabranog softvera. Dobiveni rezultati prikazani su u posljednjem dijelu poglavlja. Tako stvorena virtualna platforma poslužila je za provođenje analiza, procjena i simulacija definirane problematike.

## 6.1 TESTNO PODRUČJE

Temeljem uspostavljene suradnje s Gradom Pulom, dostupne dokumentacije i podataka, odabrano je testno područje čije je rasprostiranje određeno sukladno strategijama uspostave energetske učinkovitih četvrti primjenom tehnologije digitalnih blizanaca. Naime, temeljem Nacrta Akcijskog plana energetske učinkovitosti Grada Pule za period od 2022. do 2024. godine među provedenim analizama potrošnje energije i planiranim mjerama energetske učinkovitosti ističe se objekt Dom sportova Mate Parlov. Stoga, odlučeno je pristupiti uspostavi digitalnog blizanca četvrti u blizini navedenog objekta. Sukladno dobivenim podacima prostorne podjele na razini grada Pule (slika 6.1.), odabrane su jedinice popisnih krugova kao poligoni optimalne veličine. Priprema prostora obuhvata provedena je u softveru QGIS 3.8.3.



*Slika 6.1. Područje grada Pule i prostorna podjela na popisne krugove*

Učitani su dobiveni podaci prostorne podjele na razini grada Pule s podlogom digitalne ortofotokarte putem mrežnih usluga Državne geodetske uprave (DGU). Testno područje (slika 6.2.) nastalo je povezivanjem sljedećih popisnih krugova označenih jedinstvenom identifikacijskom oznakom:

- 0096121006,
- 0096130003,
- 0096130004,
- 0096130005,
- 0096130006,
- 0096130012,
- 0096130018,
- 0096130021,
- 0096130022,
- 0096130023,
- 0096130024,
- 0096148002,
- 0096148013.



Slika 6.2. Popisni krugovi od interesa i testno područje

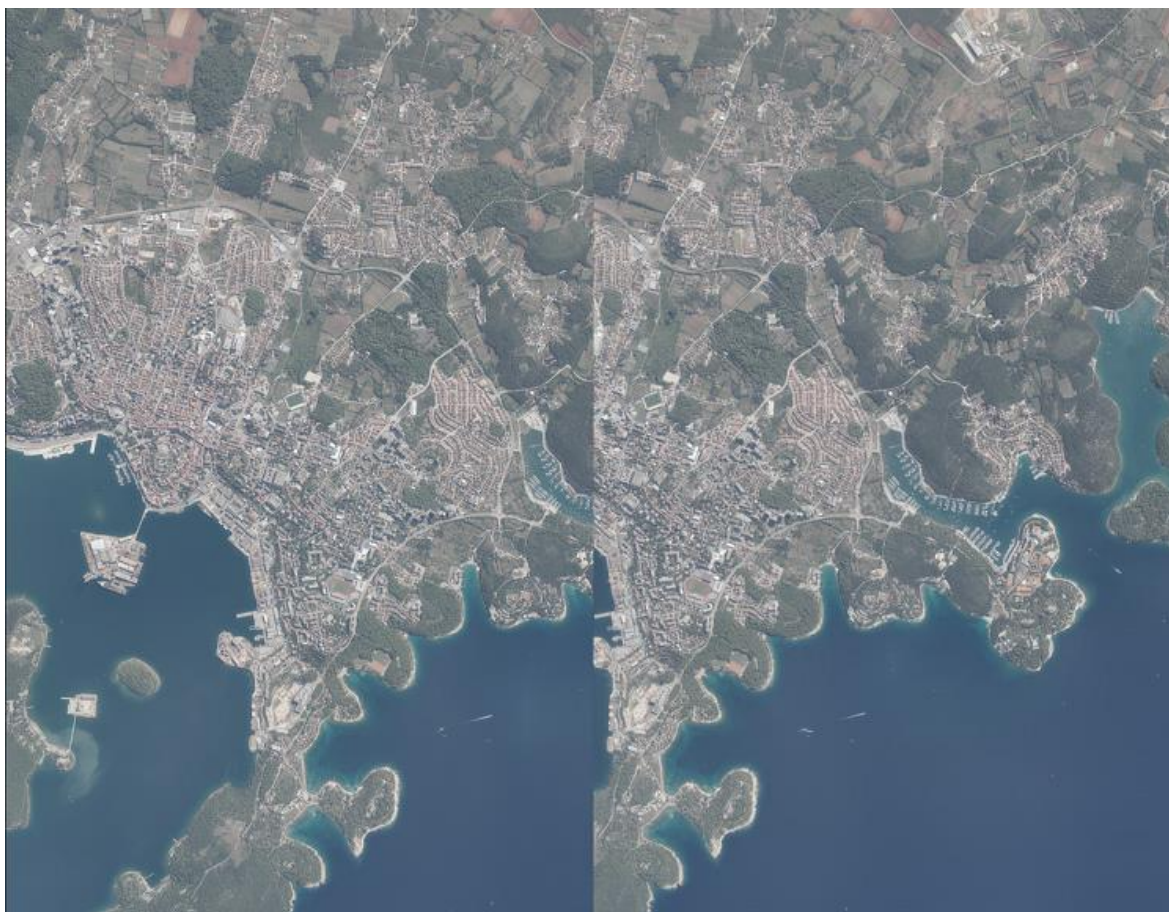
## 6.2 IZRADA DIGITALNOG MODELA POVRŠINE I ORTOMOZAIKA

Za potrebe izrade digitalnog modela površine i ortomozaika upućen je zahtjev za izdavanje aerofotogrametrijskog materijala Državnoj geodetskoj upravi. Uz zahtjev je priložen i obuhvat testnog područja te navedeno je kako su potrebni aerofotogrametrijski snimci u digitalnom obliku mjerila 1:2000 iz cikličkog snimanja. Dobiveni snimci su odgovarali traženome jer se sadržaj scene za koji se želi izraditi digitalni model površine vidi na oba snimka, odnosno u stereomodelu (slika 6.3.). Za izradu modela korišten je softver Agisoft Metashape Professional 1.8.3. Navedeni softver jedan je od najpopularnijih softvera za fotogrametrijske primjene na tržištu. Omogućuje generiranje georeferenciranih oblaka točaka, teksturiranih poligonalnih modela, digitalnih elevacijskih modela i ortomozaika na temelju seta snimaka koje se preklapaju te sadrže pridruženu prostornu informaciju.

Nakon početnih postavki i dodavanja snimki, u softver su učitane i pozicije kamere kako bi se odredio koordinatni sustav budućeg modela. Svaki snimak je nadopunjen datotekom koja sadrži informacije o položaju i orijentaciji te su isti pripremljeni za učitavanje u softver na način prikazan u tablici 6.2. Podaci pozicije i orijentacije kamere su spremljeni u .csv format te kao takvi uvezeni za prostornu referencu.

Tablica 6.2. Parametri pozicije kamera snimaka

Oznaka	X	Y	Z	Yaw	Pitch	Roll
2958-20200906-AS	293611,543	4974554,084			-0,29105	-0,29105
2959-20200906-AS	293559,668	4972873,791			-0,28934	-0,28934



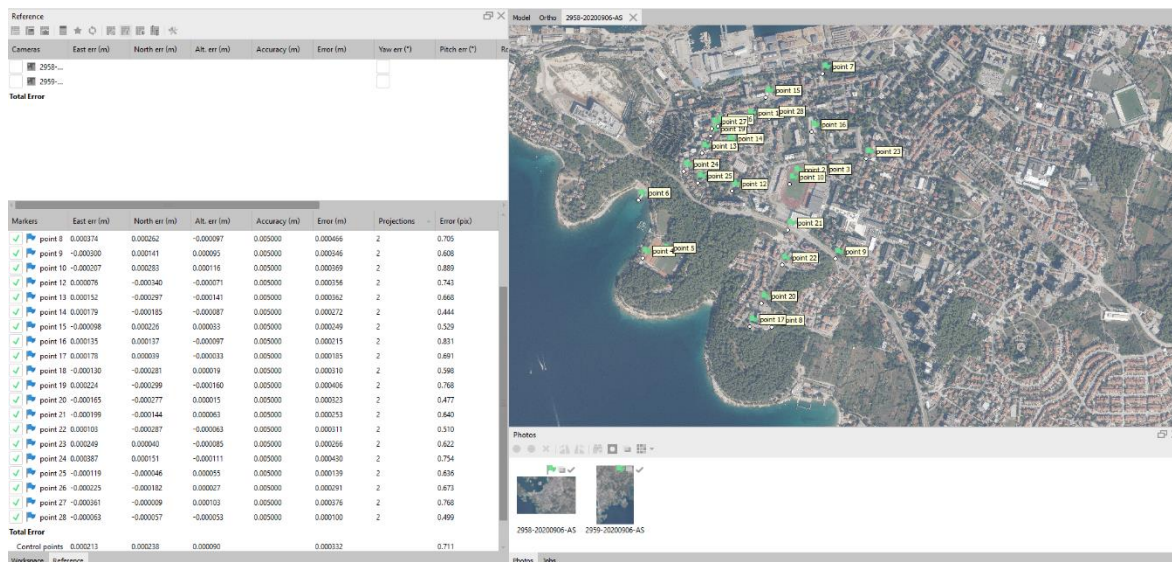
Slika 6.3. Aerofotogrametrijski snimci koji sadrže testno područje

Potom je pokrenuto poravnanje snimaka naredbom *Align Photos*. Naredbom softver pronalazi podudarne točke između snimaka koji sadrže preklope, procjenjuje poziciju kamere za svaki snimak te gradi rijetki model oblaka točaka koji je prikazan na slici 6.5.

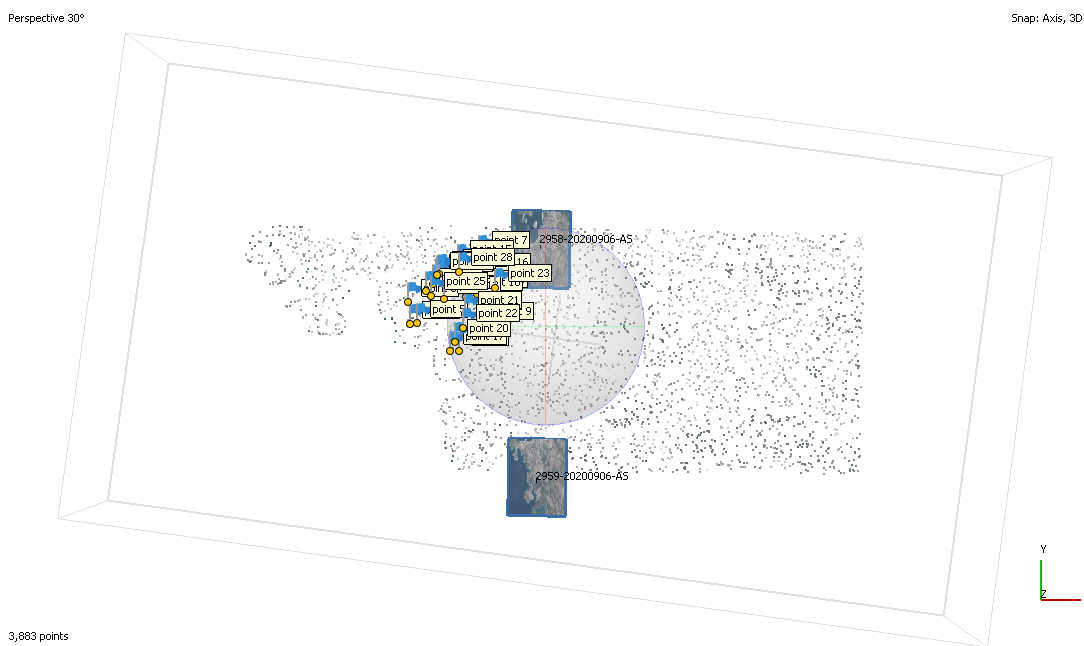
Zatim, provedeno je georeferenciranje kreiranjem markera te dodjeljivanjem položajnih koordinata. Marker se koristi za optimizaciju položaja kamere i podataka o orijentaciji. Prvo je pojedini marker kreiran na jednom snimku, a potom je postavljen na ispravnu poziciju na drugom snimku. Za postizanje optimalnih rezultata potrebno je kreirati minimalno 10-15 položajnih markera. Za konkretno područje stvoreno je 26 kontrolnih točaka raspoređenih uz granicu i unutar testnog područja (slika 6.4.). Tablica 6.3. prikazuje procjenu pogrešaka za kreirane kontrolne točke na temelju provedenog izvješća.

Tablica 6.3. Procjena pogrešaka stvorenih kontrolnih točaka

Broj točaka	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	XY (mm)	Ukupno (mm)
26	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3



Slika 6.4. Sučelje Agisoft softvera s naznačenim postavjenim kontrolnim markerima



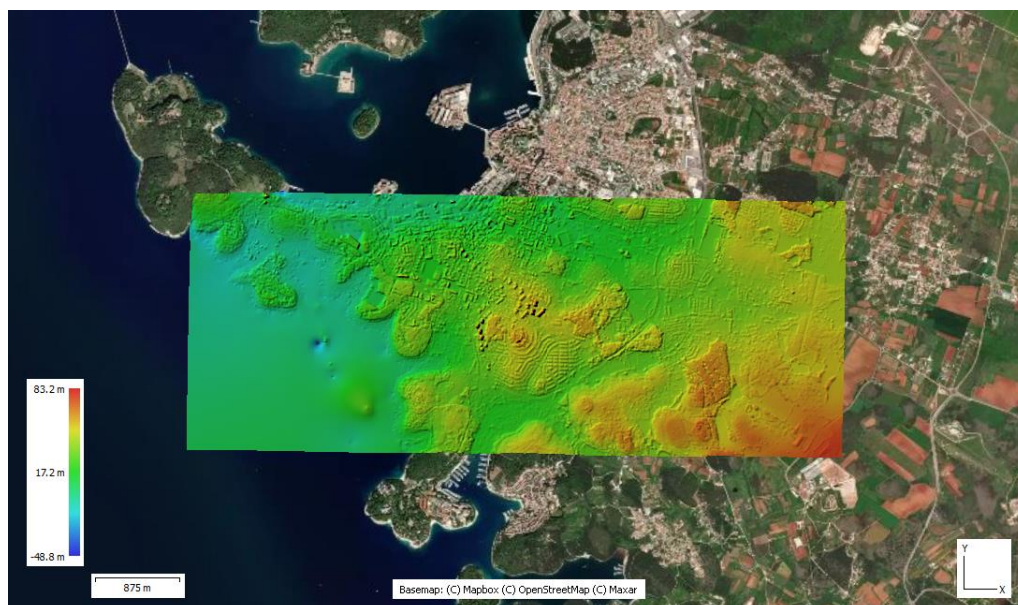
Slika 6.5. Rijetki oblak točaka interesnog područja

Sljedeći korak uključuje izradu gustog oblaka točaka naredbom *Build Dense Cloud*. U ovom koraku softver na temelju procijenjenih pozicija kamera računa informaciju o dubini za svaku kameru kako bi spojio u jedan gusti oblak točaka. Slika 6.6. prikazuje kreirani gusti oblak točaka za interesno područje.



Slika 6.6. Gusti oblak točaka interesnog područja

Potom, digitalni model površine generira se na temelju stvorenog gustog oblaka točaka ili mrežnog modela. Pri čemu, prvi način daje točnije rezultate te donosi kraće vrijeme obrade. Stoga, nije provedeno kreiranje mrežnog modela već je digitalni model površine uspostavljen na temelju gustog oblaka točaka naredbom *Build DEM*. Na slici 6.7. prikazan je kreiran digitalni model površine interesnog područja. Slika uključuje visinski raspon digitalnog modela površine rezolucije 57,9 cm/pix na podlozi OSM-a.



Slika 6.7. Digitalni model površine interesnog područja

Unutar softvera je provedeno i generiranje ortomozaika (slika 6.8.). Korištena je naredba *Build Orthomosaic* pri čemu je odabrana površina kreiranog digitalnog modela površine. Softver predlaže veličinu piksela ortomozaika od 29 cm/pix na temelju prosječne rezolucije izvornih snimki. Isto tako, veličina ortomozaika u pikselima izračunata je na temelju veličine podloge i veličine ulaznog piksela. Nadalje, generirano je izvješće izrade modela čiji su neki rezultati prethodno iskazani. Konačno, dobiveni digitalni model površine i ortomozaik su izvezeni u prikladnom rasterskom GeoTIFF formatu za daljnju upotrebu u procesu izrade.



Slika 6.8. Ortomozaik interesnog područja

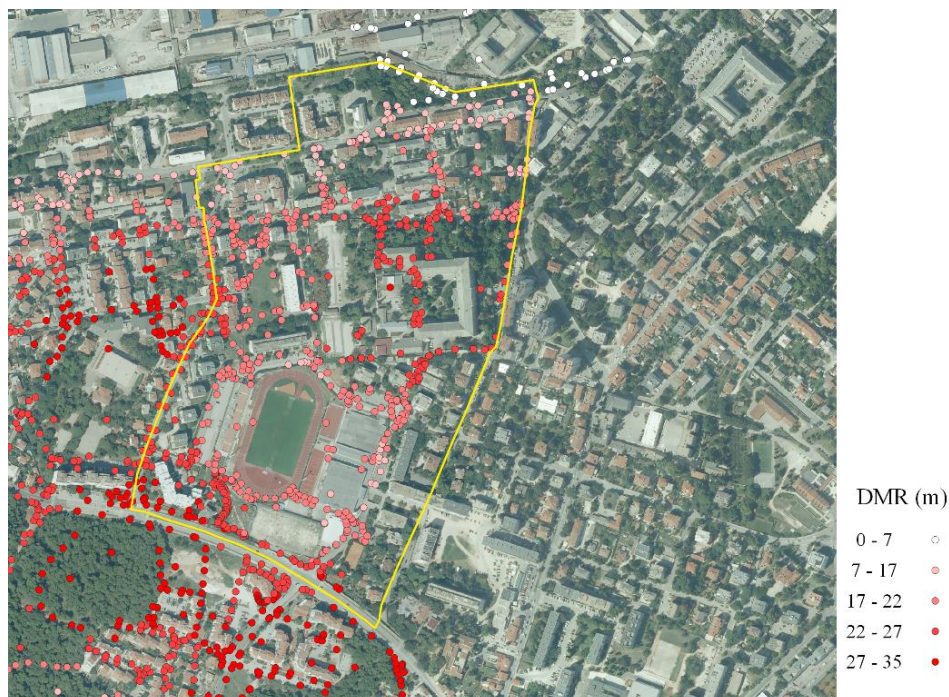
### 6.3 PRIPREMA SLOJEVA

Priprema i obrada podataka, kao i uspostava granica testnog područja, provedena je u QGIS-u 3.8.3. QGIS je besplatni geografski informacijski sustav otvorenog koda koji omogućuje kreiranje, uređivanje, vizualiziranje, analiziranje i dijeljenje geoprostornih informacija (URL 48). Odabran je kao softver za uređivanje i vizualiziranje prikupljenih podataka zbog lake dostupnosti i posjedovanja znanja rada u softveru.

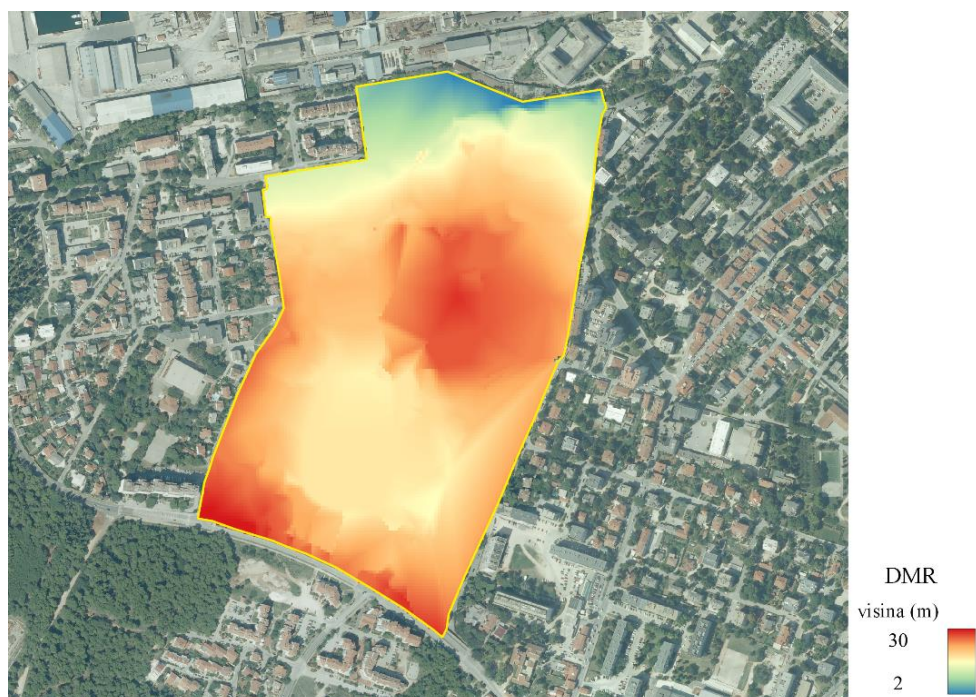
#### 6.3.1 Priprema rasterskih podataka

Prema metodologiji izrade, potreban je sloj DMR-a. Stoga je upućen zahtjev DGU za izdavanje DMR-a na temelju definiranog prostora obuhvata. Dobiven je DMR u .dwg formatu koji je pretvoren u .shp u CAD2Shape programu radi lakše daljnje upotrebe u QGISU-u. Vektorski oblik DMR-a sastoji se od točaka na određenoj udaljenosti od kojih je svakoj pridružena visina. Klasificirane vrijednosti visina u 5 klasa i pojednostavljene granice prostora testnog područja prikazane su na slici 6.9. Za daljnje računanje potreban je zapis DMR-a u rasterskom obliku te stoga je provedena interpolacija naredbom *TIN interpolation*. TIN interpolacija je jedan od alata softvera koji omogućuje stvaranje površine koju čine trokuti najbližih susjednih točaka. Uobičajeni algoritam naziva se Delaunayeva triangulacija (URL 49). Unutar same naredbe odabrana je visina točaka kao interpolacijski atribut, a opseg

je postavljen na granice testnog područja. Slika 6.10. prikazuje dobiveni rasterski zapis DMR-a testnog područja na temelju provedene interpolacije s prikladnom simbolizacijom.



Slika 6.9. Vektorski oblik digitalnog modela reljefa



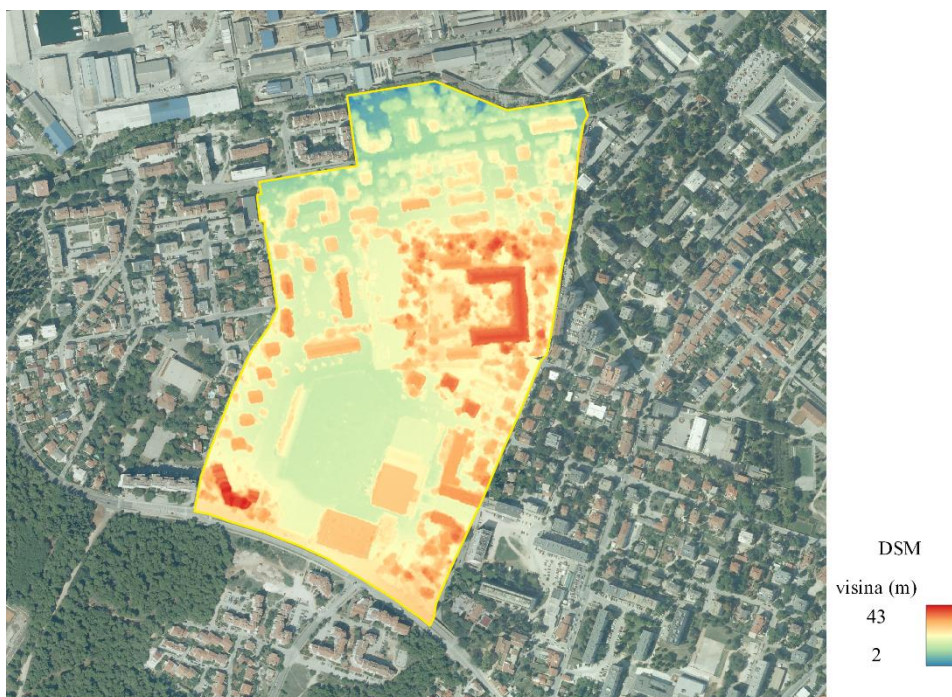
Slika 6.10. Rasterski oblik digitalnog modela reljefa

Zatim, u softver su uvezani prethodno spremljeni rasteri digitalnog modela površine i ortomozaika koji su naredbom *Clip raster by mask layer* svedeni na granice testnog područja. Na slici 6.11. prikazan je izrađen ortomozaik u granicama testnog područja. Dodatno, Digital Surface Model (DSM) stiliziran je skalom boja od hladnijih prema toplijim prikazano na slici 6.12. Sa slike je jasno vidljivo kako su više vrijednosti pridružene zgradama čiji se tlocrti jasno iscrtavaju.

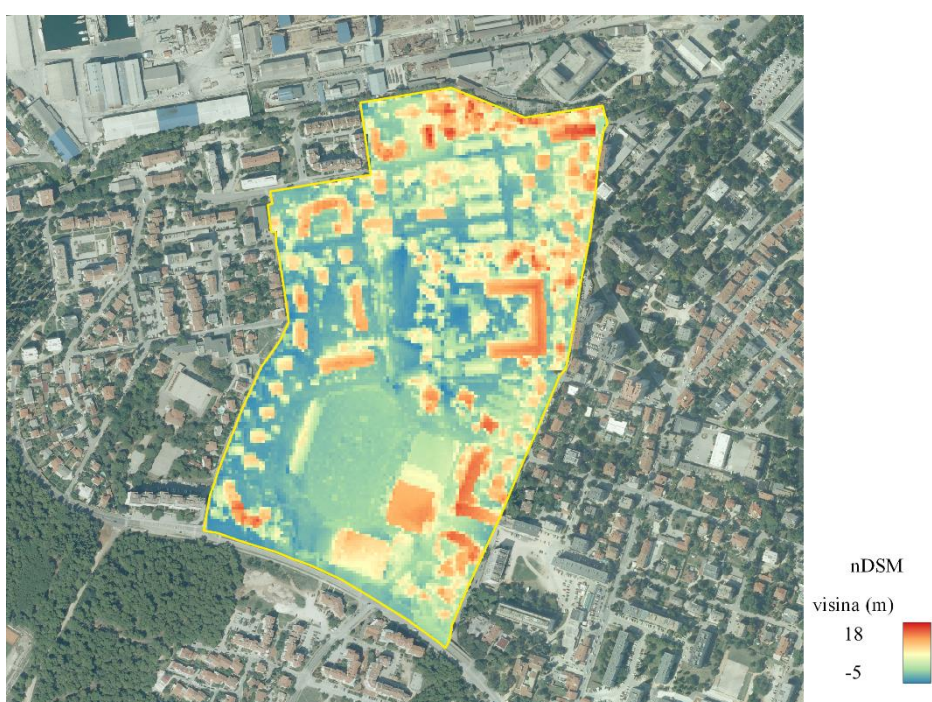


Slika 6.11. Ortomozaik testnog područja

Isto tako, u QGIS-u je provedena izrada nDSM-a koristeći ugrađeni alat *Raster Calculator*. Rješenje je dobiveno razlikom DSM-a i DMR-a. Izlazni rezultat operacije razlike dvaju rastera je raster u GeoTIFF formatu koji je automatski učitani u softver. Na slici 6.13. prikazan je nDSM s pripadajućom simbolizacijom skalom boja od najnižih do najviših vrijednosti visina. Tako su dobiveni svi potrebni rasterski slojevi za izradu projektnog dijela rada.



Slika 6.12. DSM testnog područja



Slika 6.13. nDSM testnog područja

### 6.3.2 Priprema vektorskih podataka

Dodatni vektorski podaci opisani pripadnim atributima zatraženi su od Grada Pule. Osim navedene prostorne podjele, na raspolaganje su dani potrebni tlocrti zgrada, lokacije rasvjetnih tijela te ceste i ulice. Na temelju poznavanja područja i stanja s ortofoto karte sloj zgrada je nadopunjen pojedinim objektima za koje je bilo jasno da nedostaju u danoj bazi podataka. Isto tako, svaka zgrada se sastoji od jedinstvene identifikacijske oznake, kućnog broja, ulice i ostalih popratnih informacija koje mogu poslužiti u različitim analizama. Dio stupaca i redaka atributne tablice sloja zgrade prikazan je na slici 6.14.

	OBJECTID	ZG_BR	KB	KB_ST	SRUSENO	UL_JID	UL_RB	UL_IME	PK_JID	PK_RB	PK_IME
1	816434	9	9	S	NE	0528250475	0475	GALIJOTSKA ULICA	0096148002	002	PK 002
2	810964	7	7	S	NE	0528250475	0475	GALIJOTSKA ULICA	0096148002	002	PK 002
3	816435	5	5	S	NE	0528250475	0475	GALIJOTSKA ULICA	0096148002	002	PK 002
4	816433	3	3	S	NE	0528250475	0475	GALIJOTSKA ULICA	0096148002	002	PK 002
5	810673	8	8	S	NE	0528250445	0445	PALLADIOVA ULICA	0096148013	013	PK 013
6	810765	7	7	S	NE	0528250445	0445	PALLADIOVA ULICA	0096148013	013	PK 013
7	810724	6	6	S	NE	0528250445	0445	PALLADIOVA ULICA	0096148013	013	PK 013
8	816451	5	5	S	NE	0528250445	0445	PALLADIOVA ULICA	0096148013	013	PK 013
9	816450	4	4	S	NE	0528250445	0445	PALLADIOVA ULICA	0096148013	013	PK 013

Slika 6.14. Dio atributne tablice sloja zgrade

Nadalje, sloj rasvjetnih tijela pretvoren je iz .dwg formata u .shp format kako bi bio prikladan za daljnju obradu u QGIS-u. Isto tako, tablica s opisnim podacima za pojedino rasvjetno tijelo dana je u .xlsx formatu te ista je spremljena u .csv format i kao takva učitana u softver. Putem opcije *Joins* pojedini redak je pridružen pojedinom rasvjetnom objektu na temelju jedinstvene identifikacijske oznake. Na slici 6.15. prikazan je dio atributne tablice sloja rasvjeta. Između ostaloga, u atributnoj tablici se uz prikazane stupce nalaze još podaci o ukupnoj snazi, godišnjem broju sati rada, ispravnosti te ocjeni stanja pojedine svjetiljke.

ID	LAYER	COLOR	EVATIC	Trafostani	Ulica/prom	Tip stupa	Visina svj	Tip svjetli	Broj svjet	Snaga žar	Tip žarul	Broj žaru	Broj ža_1	Regulacija	
1	4568	Postojeće s...	5	17	TS Valkane	Ulica Valkane	drveni	6	Schreder S...	1	100	VTN	1	1	Ne
2	5194	Postojeće s...	5	17	RO Gorica	Ulica Rikarda J...	fasada	8	Schreder Z2	1	150	VTN	1	1	Ne
3	5516	Trafostanica	1	0	RO Učkin u...	Učki uspon	fasada	8	Schreder S...	1	70	VTN	1	1	Ne
4	5082	Postojeće s...	5	17	TS Osiječka	Kupelwieserov...	fasada	3	Brodaska svj...	1	23	šetna	1	1	Ne
5	4982	Postojeće s...	5	0	TS Streljana 2	Ulica Vladimir...	metalni	4	Schreder Z1	1	70	VTN	1	1	Ne
6	4983	Postojeće s...	5	0	TS Streljana 2	Ulica Vladimir...	metalni	4	Schreder Z1	1	70	VTN	1	1	Ne
7	4984	Postojeće s...	5	17	TS Streljana 2	Ulica Vladimir...	metalni	4	Schreder Z1	1	70	VTN	1	1	Ne
8	4565	Postojeće s...	5	17	TS Valkane	Ulica Valkane	metalni	4	TEP Tivoli K...	1	70	VTN	1	1	Ne
9	4566	Postojeće s...	5	17	TS Valkane	Ulica Valkane	metalni	4	TEP Tivoli K...	1	70	VTN	1	1	Ne

Slika 6.15. Dio atributne tablice sloja rasvjeta

Zatim, navedeni vektorski podaci su svedeni na prostor testnog područja koristeći naredbu *Intersect* čime se čuvaju atributni podaci oba ulazna sloja. Konačni rezultat te smještaj

zgrada, ceste i rasvjete testnog područja prikazan je na slici 6.16. Na testnom području se nalazi ukupno 122 zgrade i 162 rasvjetna tijela.



Slika 6.16. Vektorski podaci testnog područja

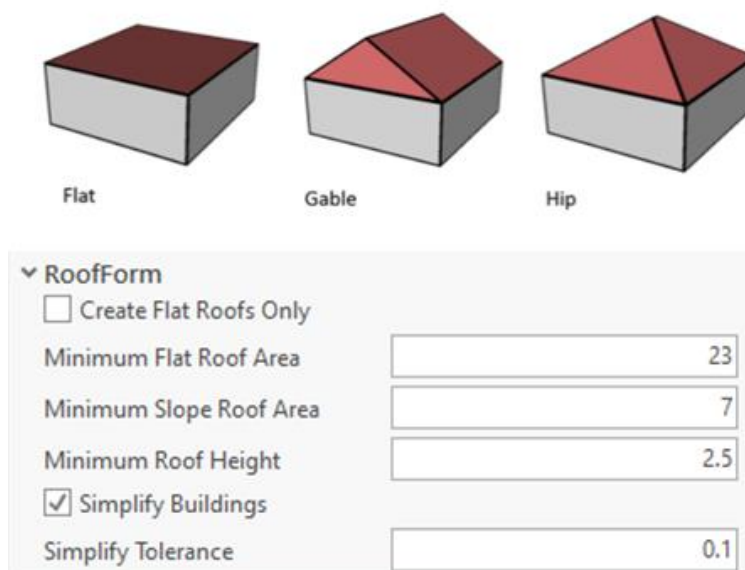
## 6.4 OKOSNICA DIGITALNOG BLIZANCA

Uspostava 3D modela testnog područja provedena je u softveru ArcGIS Pro 2.9. Navedeni softver podržava izradu digitalnih blizanaca, interoperabilan je s već pripremljenim slojevima te omogućuje dijeljenje aplikacija i modela na različitim web platformama kako bi se omogućio pristup bitnim informacijama. Nadalje, softver nudi gotova rješenja koja omogućuju kreiranje, vizualizacije te provođenje različitih analiza koristeći tehnologiju digitalnih blizanaca (URL 50). Tako stvoreni digitalni blizanci omogućuju poboljšano razumijevanje i donošenje odluka za određene urbane probleme. ArcGIS tehnologija je stoga temelj za digitalne blizance, pružajući rješenja gradskim vlastima za postizanje zacrtanih vizija i transformacijskih ciljeva.

### 6.4.1 3D model zgrada

Izrada 3D modela zgrada ostvarena je koristeći *3D Basemaps*. To je rješenje ArcGIS-a koje pruža različite alate za kreiranje 3D slojeva na temelju postojećih podataka. Prilikom pokretanja softvera odabrana je lokalna scena te učitani su slojevi potrebni za izradu 3D modela zgrada. Za nadmorsku visinu tla postavljen je izrađeni DMR testnog područja. Uvezeni su još DSM i nDSM testnog područja te poligoni zgrada. Unutar *3D Basemaps* rješenja korišten je alat *Create Buildings* koji generira 3D model zgrada. Na temelju visinskih površina i tlocrta zgrada alat razlikuje ravne i nagnute površine krovova. Isto tako, procjenjuje standardni oblik krovova (slika 6.17.) koristeći attribute koji informiraju

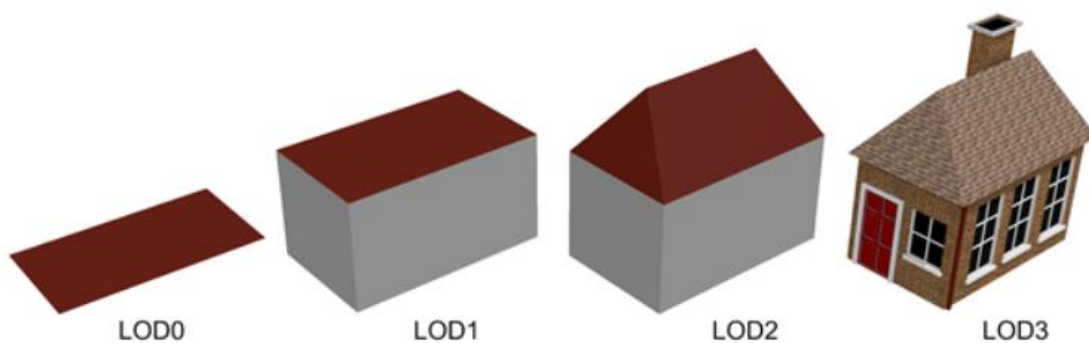
proceduralna pravila za generiranje (URL 51). Nakon pridruženih visinskih površina, uneseni su i parametri za kreiranje različitih tipova krovova (slika 6.17.).



Slika 6.17. Mogući tipovi krovova i unesene postavke (URL 51)

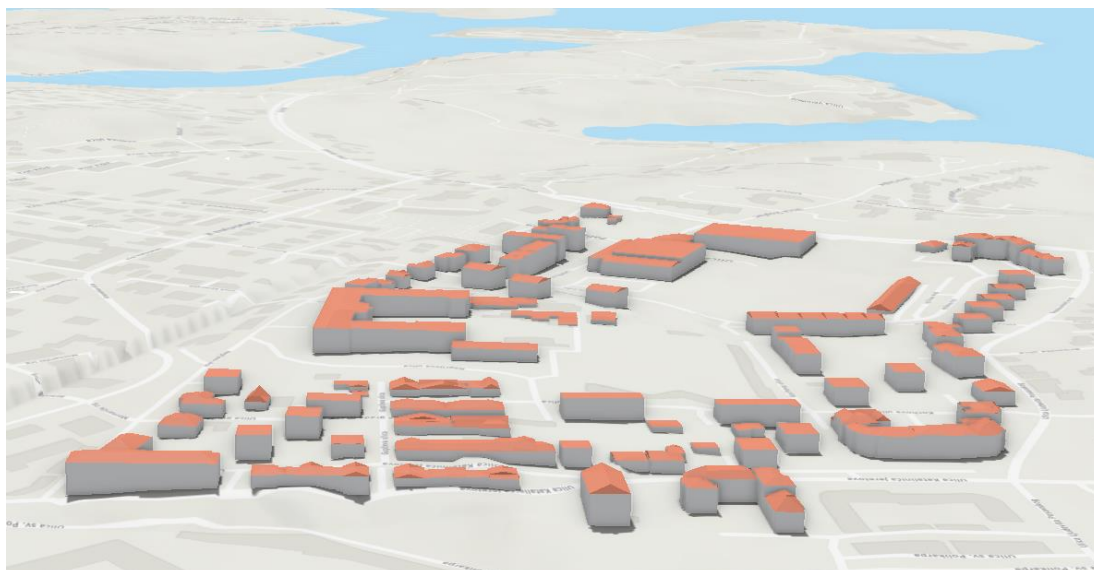
Stvorene su zgrade LOD2 razine detaljnosti, odnosno 3D poligoni s krovnim oblicima. Razina detalja odnosi se na geometrijsku zamršenost 3D modela (URL 52). Sukladno CityGML standardu razlikujemo 4 razine detaljnosti prikazane na slici 6.18.:

- LOD0,
- LOD1,
- LOD2,
- LOD3.



Slika 6.18. Razine detaljnosti 3D modela zgrada (URL 52)

Za potrebe izrade ovog rada LOD2 razina detalja je prikladan stupanj detaljnosti temeljen na visini zgrada i karakteristikama krovova. Rezultat provedenog zadatka na testnom području prikazan je na slici 6.19. Dok, slika 6.20. prikazuje objekt izbliza kako bi se bolje vidjele karakteristike krova.



*Slika 6.19. 3D model zgrada testnog područja*



*Slika 6.20. 3D model zgrada s karakteristikama krova*

Dodatno, generirani sloj 3D modela zgrada je na temelju provedenog algoritma nadopunjen novim podacima čije su pojedine vrijednosti prikazane na slici 6.21. Pritom, atribut BLDGHEIGHT označava maksimalnu visinu zgrade, EAVEHEIGHT minimalnu visinu zgrade, ROOFORM standardni oblik krova prikazan na slici 6.17., BASELEV osnovnu visinu zgrade te ROOFDIR označava smjer prema kojem je krov okrenut u stupnjevima. Tako stvoreni podaci predstavljaju dodanu vrijednost koja može poslužiti gradskim vlastima za provođenje različitih analiza.

ORIG_FID	BLDGHEIGHT	EAVEHEIGHT	ROOFORM	BASELEV	ROOFDIR
41	9.25926	3.84179	Gable	19.03041	315
102	12.00173	10.14945	Gable	25.54614	270
91	5.57765	3.44964	Gable	23.42743	270
97	6.10321	3.99412	Gable	20.20143	270
16	7.08731	3.22333	Gable	17.96574	225
2	7.05629	5.88983	Gable	22.87307	225
78	12.52751	10.96136	Gable	16.07869	225
109	7.953	5.66166	Gable	22.49882	180
119	18.08269	13.86491	Gable	7.559416	180
14	9.98991	8.29791	Gable	21.29293	180
28	11.82661	9.9907	Gable	22.27392	180
29	10.82266	9.09308	Gable	22	180

Slika 6.21. Dio atributne tablice stvorenog 3D sloja zgrada

#### 6.4.2 3D model stabala

Za potrebe izrade 3D modela stabala, ali i stvaranja zornijeg prikaza stvarnog stanja, u softver je uvezen stvoreni ortomozaik testnog područja. 3D model stabala je kreiran koristeći algoritam dubokog učenja *Detect Objects Using Deep Learning*. Pritom, korišten je model *Tree Detection*. To je Esrijev model dubokog učenja za otkrivanje stabala na snimkama visoke rezolucije (URL 53). Postavke provedenog algoritma prikazane su na slici 6.22., dok slika 6.23. prikazuje izlazni rezultat- sloj koji sadrži detektirana stabla u obliku poligona.

Arguments	
Name	Value
padding	100
threshold	0.1
nms_overlap	0.1
batch_size	4
exclude_pad_detections	True
test_time_augmentation	False

Slika 6.22. Postavke *Tree Detection* modela



Slika 6.23. Detektirana stabla u obliku poligona

Zatim, u atributnu tablicu novostvorenog sloja dodani su novi stupci Povrsina i Promjer čije su vrijednosti prikazane na slici 6.24. Promjer je izračunat prema formuli (1).

$$\text{Promjer} = \sqrt{\text{Povrsina} / \pi} * 2 \quad (1)$$

Confidence	Promjer	Povrsina	ORIG_FID
29.951611	10.459479	85.923104	0
63.652294	20.101146	317.344902	1
63.515507	9.935645	77.532176	2
62.664925	9.96781	78.034997	3
57.689835	10.284369	83.070189	4
56.557697	11.766914	108.746429	5
53.827621	9.314039	68.134337	6
42.560299	8.498326	56.722674	7
41.093216	10.919191	93.642021	8
40.322666	7.837796	48.247837	9
40.096397	9.629859	72.833256	10
39.128292	7.025562	38.766088	11
38.086662	21.066583	348.560425	12

Slika 6.24. Dio atributne tablice sloja stabla

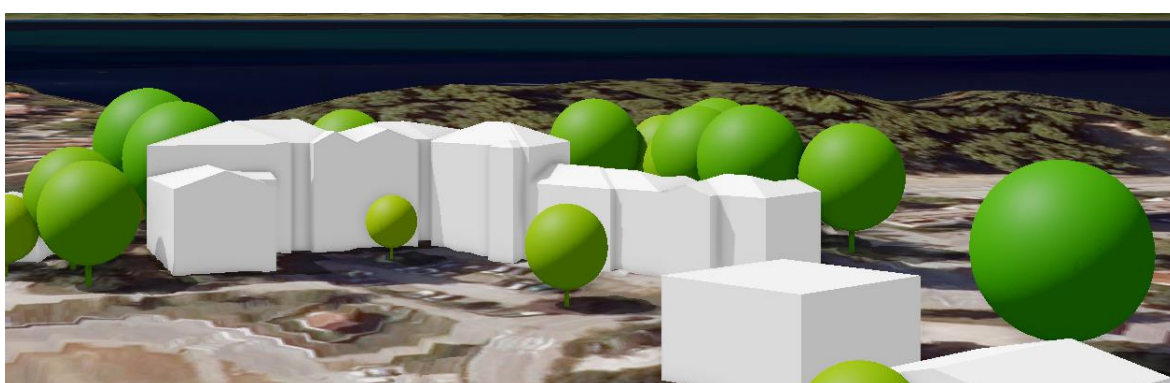
Potom je pokrenut alat *Features to Points* čiji je izazni rezultat prikazan na slici 6.25. Tako je sloj poligona stabala pretvoren u točke koje će poslužiti za stvaranje 3D prikaza. Prilikom dodjeljivanja simbola odabran je 3D Model mark stabla iz postojeće baze tematskih 3D prikaza stabala. Potom je svakom stablu dodijeljena visina proporcionalno izračunatom promjeru, što ne odražava stvarno stanje, ali pridonosi stvaranju karakterističnijeg prikaza uspostavom relativnih odnosa. Vrijednosti visina stabala se kreću od 1,2 do 12,6 metara. Isto tako, sukladno promjeru, provedeno je i toniranje zelene boje pojedinog stabla čime je dobiven konačan rezultat uspostave 3D modela prikazan na slici 6.26 i 6.27. поближе.



*Slika 6.25. Detektirana stabla u obliku točaka*



*Slika 6.26. 3D model stabala*



*Slika 6.27. Relativni odnos 3D stabala*

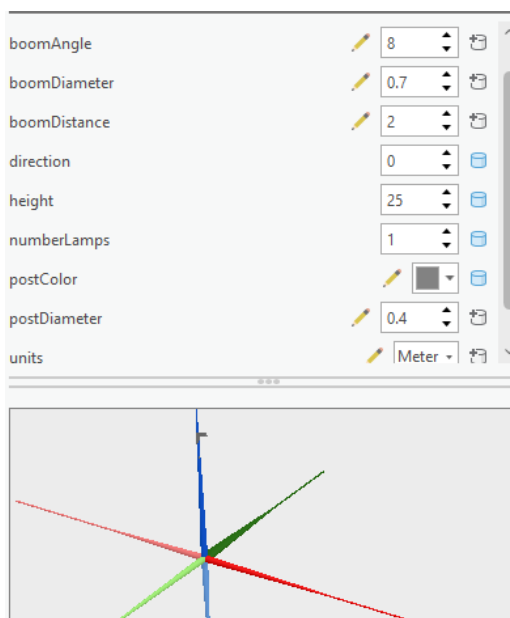
### 6.4.3 3D model rasvjetnih tijela

Izrada 3D modela rasvjetnih tijela temeljena je na učitanim pripremljenim vektorskim slojevima rasvjete i cesti. Za uspostavu trodimenzionalnog prikaza s rotacijom pojedinog rasvjetnog tijela pristupilo se sljedećim koracima. Korišten je alat *Near* koji omogućuje određivanje smjera pojedine svjetiljke s obzirom na središnju liniju najbliže ceste. Sljedeće, dobiveni stupac *NEAR\_ANGLE* preimenovan je u *direction*, dok je postojeći stupac *Visina\_svj* pretvoren u numerički stupac *VISINA*. Isto tako, dodan je novi stupac boja koji se temelji na postojećem stupcu *COLOR* kako bi zapis boje bio u jeziku koji će primijenjeni algoritam moći prepoznati. Prilikom kreiranja novog stupca korišten je *Calculate Field* alat atributne tablice. Kreirani kod i novostvoreni stupci sloja rasvjete prikazani su na slici 6.28.

boja =	NEAR_FID	NEAR_DIST	NEAR_X	NEAR_Y	direction	VISINA	boja
reclass(!COLOR!)	8	3.06013	289428.273398	4972029.166187	-122.6799	8	#778899
Code Block	16	8.479555	289369.935946	4971959.184373	-121.537246	4	#778899
<pre>def reclass(COLOR):     if (COLOR == 5):         return "#778899"     else:         return "#88707B"</pre>	16	7.213036	289334.338479	4971980.077354	-116.021512	4	#778899
	15	9.059921	289357.857829	4972268.557717	-114.697417	6	#778899
	16	20.335264	289188.282096	4972042.939895	-106.392998	8	#778899
	15	9.537111	289162.75999	4972137.998256	-106.137078	3	#778899
	11	2.387506	289587.850675	4972594.212087	-83.139952	4	#778899

Slika 6.28. Korišteni kod za definiranje boja i dio atributne tablice sloja rasvjeta

Nadalje, 3D model rasvjetnih tijela omogućen je primjenom simbolizacije *Procedural marker*. Pritom, učitana je datoteka *StreetLight\_Single.rpk* koja sadrži paket pravila za uspostavu 3D rasvjetnih tijela koja se temelji na Computer Generated Architecture (CGA) gramatici oblika (URL 54). Kako bi pravila datoteke bila ispravno povezana s određenim atributima, postavke za pojedinu karakteristiku pridružene su s postojećim stupcima sloja rasvjete. Tako je pridružena rotacija, visina, broj i boja pojedinog rasvjetnog tijela (slika 6.29.)

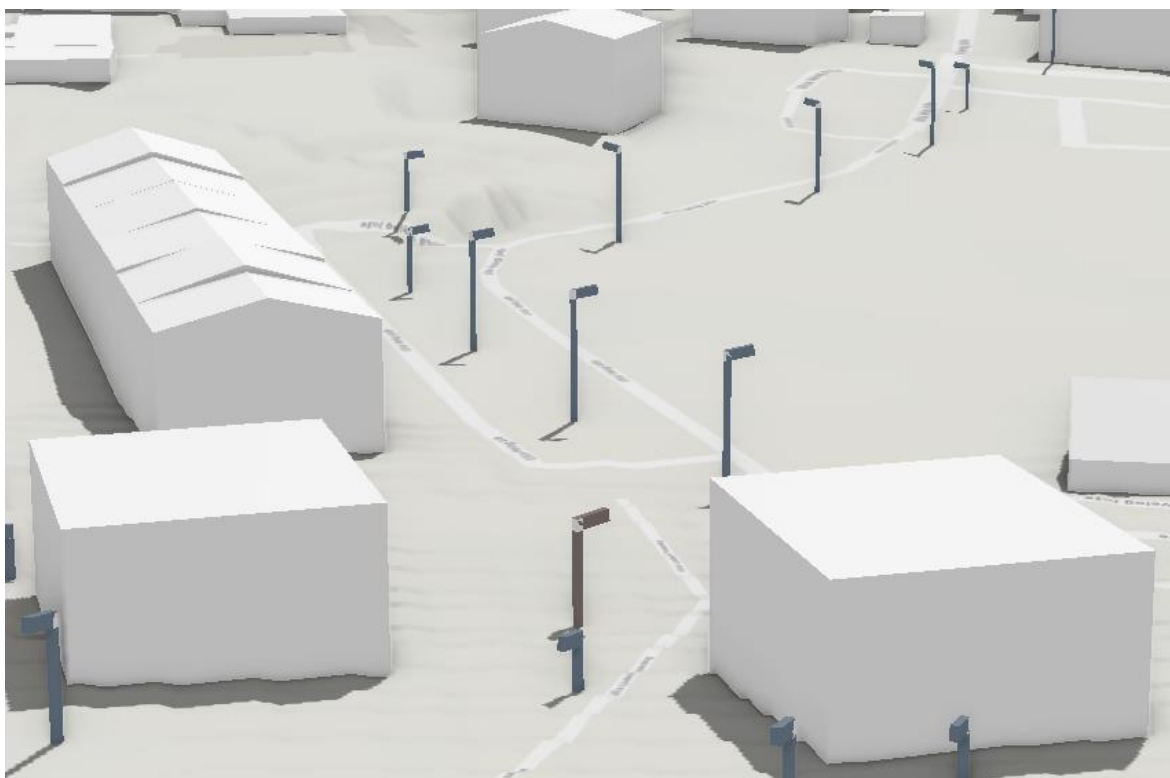


Slika 6.29. Parametri uspostave 3D modela rasvjetnih tijela

Ostale vrijednosti su postavljene intuitivno, a potrebno je naglasiti kako za manji udio objekata nisu postojale pojedine informacije koje su također popunjene koristeći srednju pojavnost vrijednosti. Pokretanjem primijenjenog paketa kreiran je 3D model rasvjetnih tijela prikazan na slici 6.30. Slika 6.31. prikazuje karakterističnu rotaciju i vizualizaciju pojedine svjetiljke.



*Slika 6.30. 3D model rasvjetnih tijela*



*Slika 6.31. Rotacija 3D rasvjetnih tijela*

## 6.5 DOBIVENI REZULTATI

Konačno, 3D modeli rasvjetnih tijela javne rasvjete pridruženi su stvorenim 3D modelima zgrada i stabala za dobivanje krajnjeg izgleda uspostavljenog 3D modela testnog područja (slika 6.32.). Uspostavljeni 3D semantički model, okosnica je digitalnog blizanca, koji se temelji na rasterskim i vektorskim podacima prikupljenim iz više organizacijskih izvora. Osnovni koncept uspostavljenog digitalnog modela je višeslojna struktura. Teren, visinska podloga relevantna za pozicioniranje zgrada, stabala i rasvjetnih tijela, je interpolirani DMR. Zatim, ortomozaik, proizašao iz stereopara aerofotogrametrijskih snimaka, predstavlja rastersku podlogu koja daje zorniju sliku prostora.

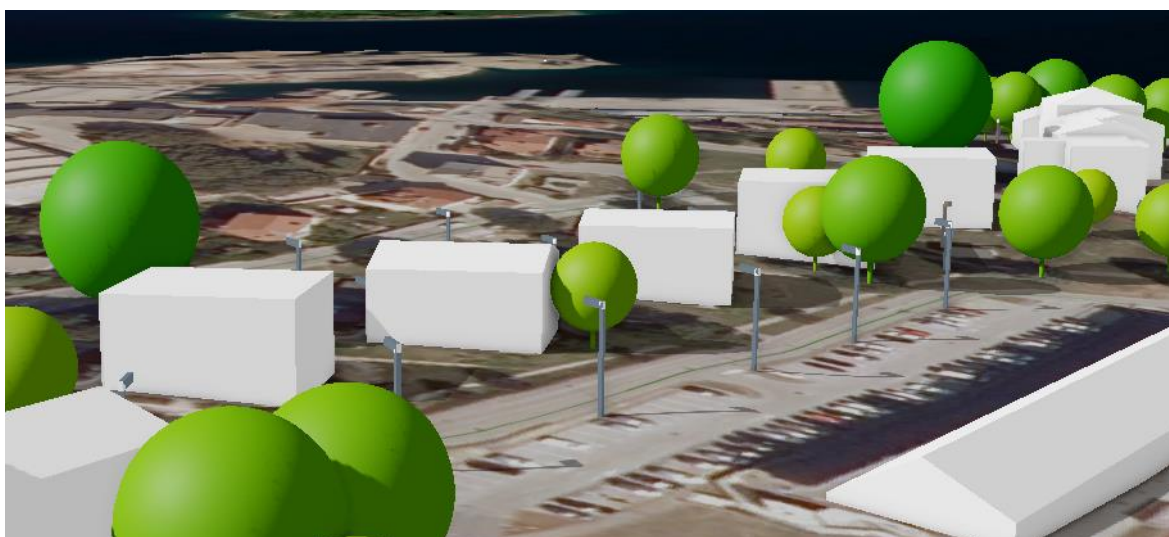
3D modeliranje zgrada provedeno je sukladno LOD2 razini detaljnosti s vjerodostojnim visinama objekata te karakterističnim oblicima krovova zgrada. Koristeći algoritme dubokog učenja softvera stvoreni su 3D modeli stabala testnog područja čija je vizualizacija proporcionalna pretpostavljenom promjeru krošnje. Pritom, korištena je tematska simbolizacija 3D objekata. 3D modeli rasvjetnih tijela temelje se na korištenju proceduralnih pravila sukladno prikupljenim podacima. Rasvjetna tijela su prikazana sukladno visini, boji, broju svjetiljki te orijentaciji s obzirom na središnju os ceste. Slika 6.33. i slika 6.34. поближе prikazuju uspostavljeni 3D model testnog područja s podlogom ortomozaika te zgradama, stablima i rasvjetnim tijelima.



*Slika 6.32. Konačan izgled okosnice digitalnog blizanca testnog područja*



*Slika 6.33. Uvećan prikaz okosnice digitalnog blizanca testnog područja*



*Slika 6.34. Uvećan prikaz uspostavljenog 3D modela testnog područja*

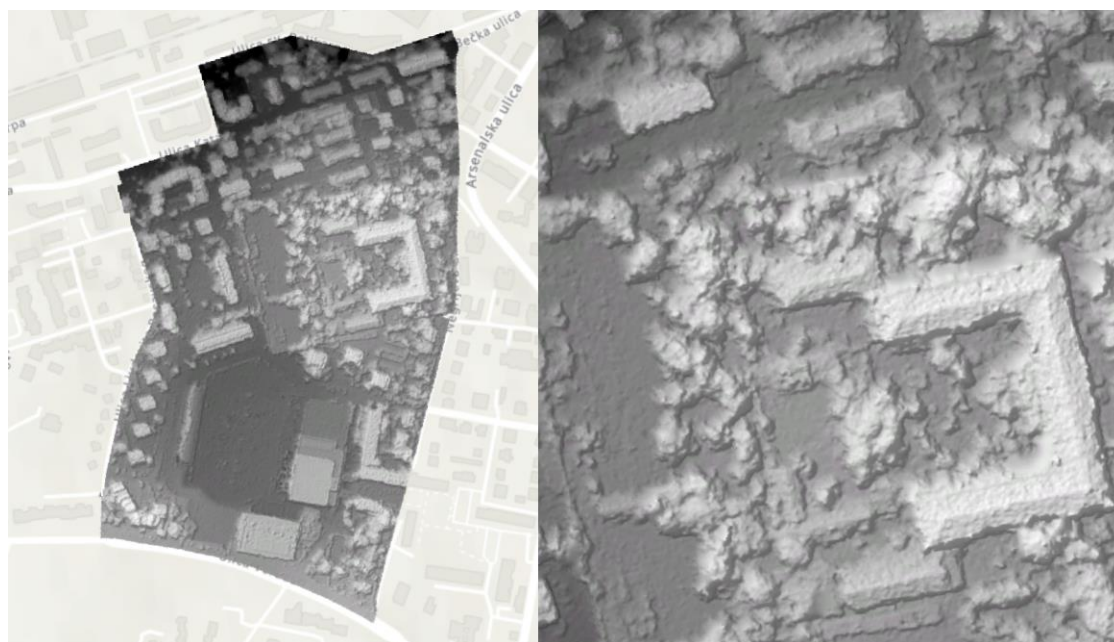
## 7. PRIMJENA USPOSTAVLJENOG DIGITALNOG BLIZANCA

Sukladno globalnim i europskim ciljevima održivog razvoja urbanih područja kroz stvaranje energetske učinkovite četvrti te u tom kontekstu konkretnim mjerama Grada Pule, definirana je problematika uspostave digitalnog blizanca testnog područja. Pritom, prostorne granice određene su blizinom najvećeg potrošača energije, Doma sportova Mate Parlov. Konkretni problemi odnose se na ispitivanje potencijala ugradnje fotonaponskih sustava na krovove postojećih zgrada, posebice navedenog objekta. Zatim, ostvarivanje održivog razvoja kroz testiranje utjecaja planiranog razvoja na gradsku četvrt. Isto tako, mogućnosti primjene digitalnog blizanca na planiranu mjeru zamjene postojeće rasvjete pametnim rješenjima. Analize i testiranja u virtualnom okruženju provedena su koristeći *Development Impact Analysis* rješenje ArcGIS-a.

### 7.1 ANALIZA SOLARNOG POTENCIJALA KROVOVA ZGRADA

#### 7.1.1 Procjena sunčeva zračenja za 2022. godinu

Primarno, DSM je relevantna podloga za provođenje analize. Rasterska podloga pruža vrijednosti visina koje predstavljaju prepreke te nagib i orijentaciju, nužne za dobivanje konačnog rezultata. Isto tako, za zorniji prikaz visina objekata i oblika krovova zgrada provedeno je sjenčanje naredbom *Hillshade* (slika 7.1.).

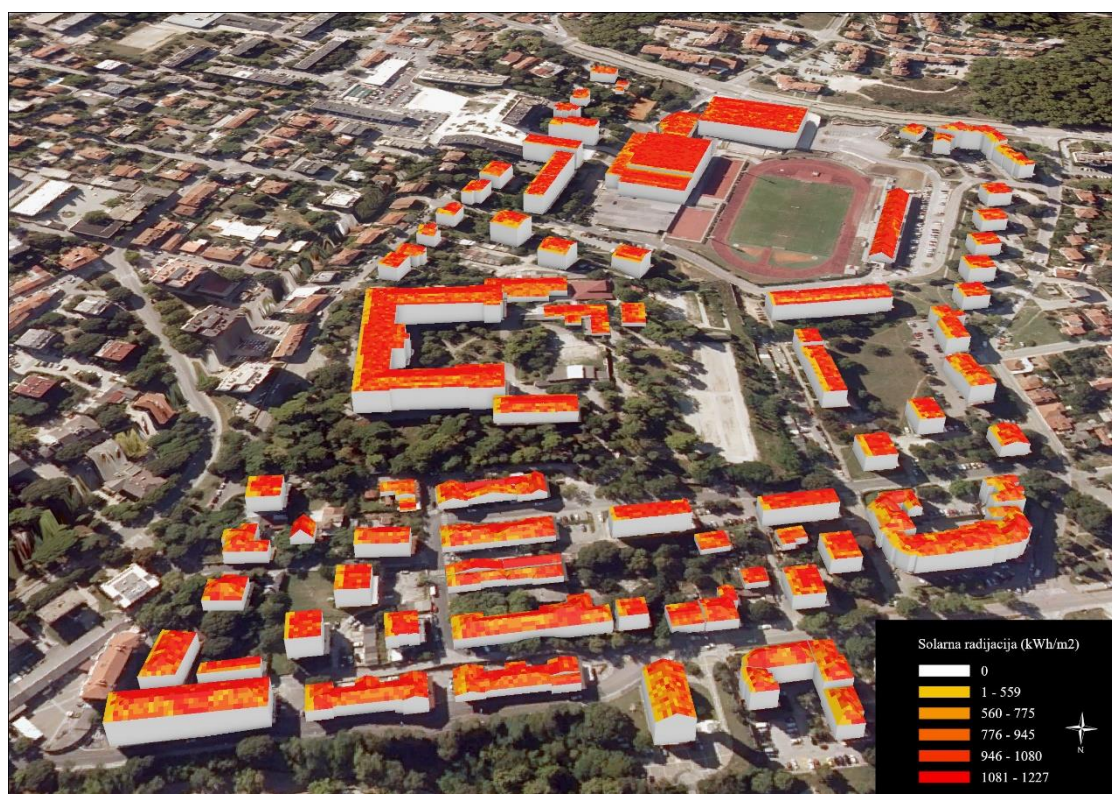


Slika 7.1. Rezultat provedenog sjenčanja na DSM-u

Procjena količine sunčeva zračenja provedena je koristeći alat *Area Solar Radiation*. Izlazno rješenje temelji se na modelu koji uzima u obzir položaj Sunca tijekom cijele godine i u različita doba dana te prepreke sučevoj svjetlosti poput obližnjih stabala, nagib i orijentaciju terena. Pritom, postavljen je izračun za svakih sat vremena u 2022. godini, pri čemu se pozicije Sunca temelje na geografskoj širini DSM-a. Na temelju postavljenih parametara

stvoren je raster čijoj je svakoj ćeliji pridružena vrijednost solarnog zračenja izražena u  $\text{Wh/m}^2$ . Potom su vrijednosti nastalog rastera pretvorene u  $\text{kWh/m}^2$  koristeći *Raster Calculator*. Za dobivanje karakterističnog prikaza na krovovima zgrada poslužio je alat *Visualize Solar Radiation on Building Roofs* unutar *Development Impact Analysis* rješenja.

Pritom, korištena je uniformna simbolizacija skalom boja za sve naredne prikaze. Tako je moguće vizualno usporediti moguće razlike. Bijela boja označava nepostojanje solarnog zračenja za ugradnju solarnih panela. Zatim, gradacija žute do crvene boje označava porast sunčeva zračenja izraženog u  $\text{kWh/m}^2$ , a samim time i mogućnosti ugradnje fotonaponskih sustava na krovove. Na slici 7.2. prikazana je procjena količine sunčeva zračenja testnog područja za 2022. godinu, gledano sa sjeverne strane. Dok, slika 7.3. prikazuje procjenu količine sunčeva zračenja na krovovima zgrada za 2022. godinu, s južne strane.

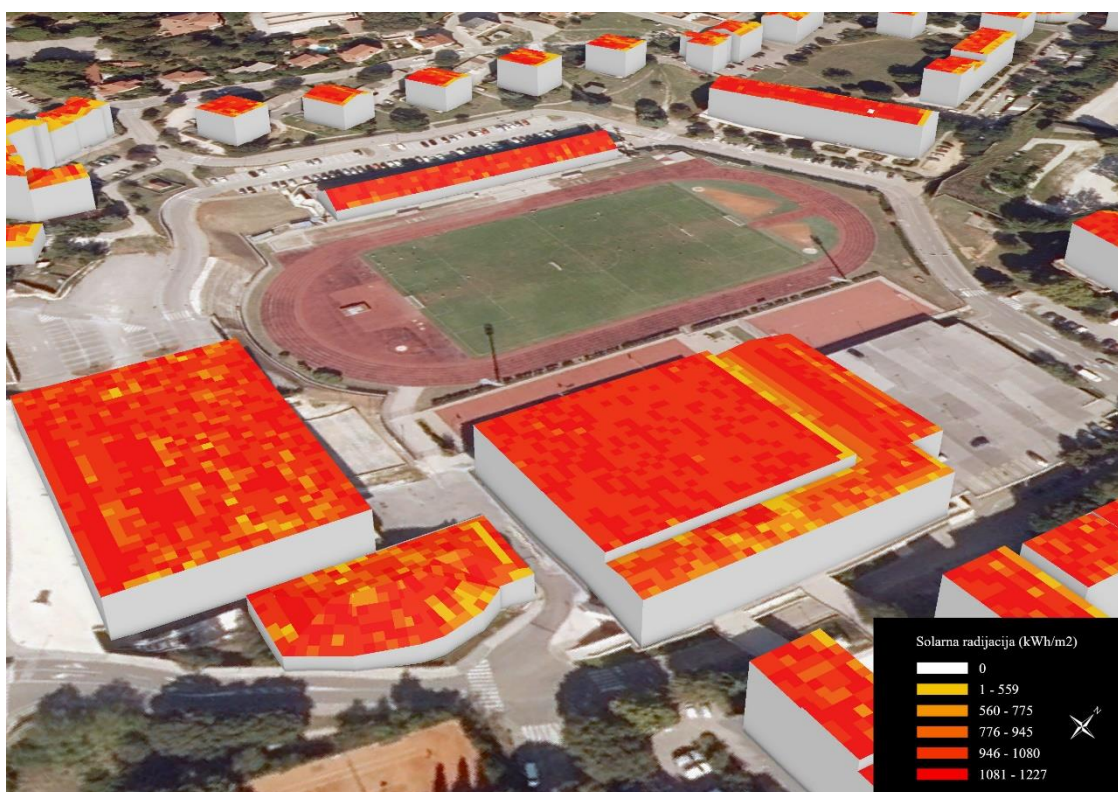


Slika 7.2. Procjena količine sunčeva zračenja za 2022. godinu- prikaz sa sjeverne strane

Usporedbom dvaju prikaza ističe se kako površine krovova okrenute prema sjeveru poprimaju više žute i narančaste tonove sukladno manjoj količini sunčeve energije. Isto tako, pojedine ćelije koje su obojene svjetlijim tonovima ukazuju na postojanje određenih prepreka koje blokiraju prodor sunčevoj svjetlosti. Prepreke se uglavnom odnose na visoke zgrade ili stabla. S druge strane, površine krovova s južne strane obojene su crvenom bojom u skladu s klasifikacijom veće količine sunčeva zračenja. Slika 7.4. prikazuje uvećano testno područje, kako bi se stavio naglasak na objekt od interesa, Dom sportova Mate Parlov. Pritom, veća količina sunčeve energije dopire do više ravne površine objekta. Dok, svjetliji tonovi označavaju zaklonjene površine sa sjeverne strane.



Slika 7.3. Procjena količine sunčeva zračenja za 2022. godinu- prikaz s južne strane



Slika 7.4. Procjena količine sunčeva zračenja- Dom sportova za 2022. godinu

### 7.1.2 Identifikacija odgovarajućih krovnih površina

U nastavku je provedena analiza pronalaska prikladnih površina krovova zgrada za ugradnju fotonaponskih sustava. Pritom, u obzir su uzeta tri kriterija. Kako strmi krovovi primaju manje sunčeve svjetlosti, tako prvi kriterij uključuje površine krovova čiji je nagib 45 stupnjeva ili manji. Sljedeće, iz stvorenog rasterskog sloja odgovarajući krovovi trebaju zaprimiti barem 800 kWh/m<sup>2</sup> sunčeva zračenja. Treće, iz rješenja se isključuju površine okrenute ka sjeveru koje zaprimaju manje količine sunčeve energije.

Za potrebe određivanja nagiba i orijentacije iz postojećeg DSM-a kreirani su dodatni slojevi putem *Surface Parameters*. Odabirući pritom parametre *Slope* i *Aspect* čiji su rezultati prikazani na slici 7.5. Zatim, ispunjavanje zadanih kriterija omogućeno je korištenjem *Con* alata koji se temelji na uvjetnoj *if/else* petlji. Prvo, isključivanje strmih krovova omogućeno je dodjeljivanjem *NoData* vrijednosti za ćelije čiji je nagib veći od 45 stupnjeva. Pritom su ostalim ćelijama pridružene vrijednosti već stvorenog rasterskog sloja solarnog zračenja. Sljedeći kriterij uključuje provođenje uvjeta čime se iz nastalog sloja filtriraju vrijednosti jednake ili veće od 800 kWh/m<sup>2</sup>. Treći kriterij odnosi se na eliminaciju površina krovova koje su okrenute prema sjeveru s obzirom na male količine sunčeve energije. Veći dio navedenih vrijednosti ćelija već je uklonjen definiranjem uvjeta minimalne količine, a preostali dio ispunjavanjem sljedećeg uvjeta. Naime, sjeverne površine odnose se na vrijednosti sloja orijentacije manje od 22.5 stupnjeva ili veće od 337.5 stupnjeva. Pritom, prethodno je kreiran sloj nagiba koji uzima u obzir ravne krovove manje od 10 stupnjeva nagiba. Stoga su *FALSE* vrijednosti uvjeta sjeverne orijentacije zamijenjene vrijednostima ravnih krovova koje ostvaruju solarni potencijal. Dodatno, kao izlazni raster naznačen je već selektirani raster solarnog zračenja. Tako je stvorena podloga u kojoj su uklonjene sve površine koje nisu odgovarajuće za ugradnju solarnih panela. Slika 7.6. i 7.7. prikazuju rezultat provedenih analiza na krovovima testnog područja s prikazima prikladnih površina sa sjeverne i južne strane. Isto tako, slika 7.8. omogućuje pobliži prikaz prikladnih površina za objekt od interesa, Dom sportova.



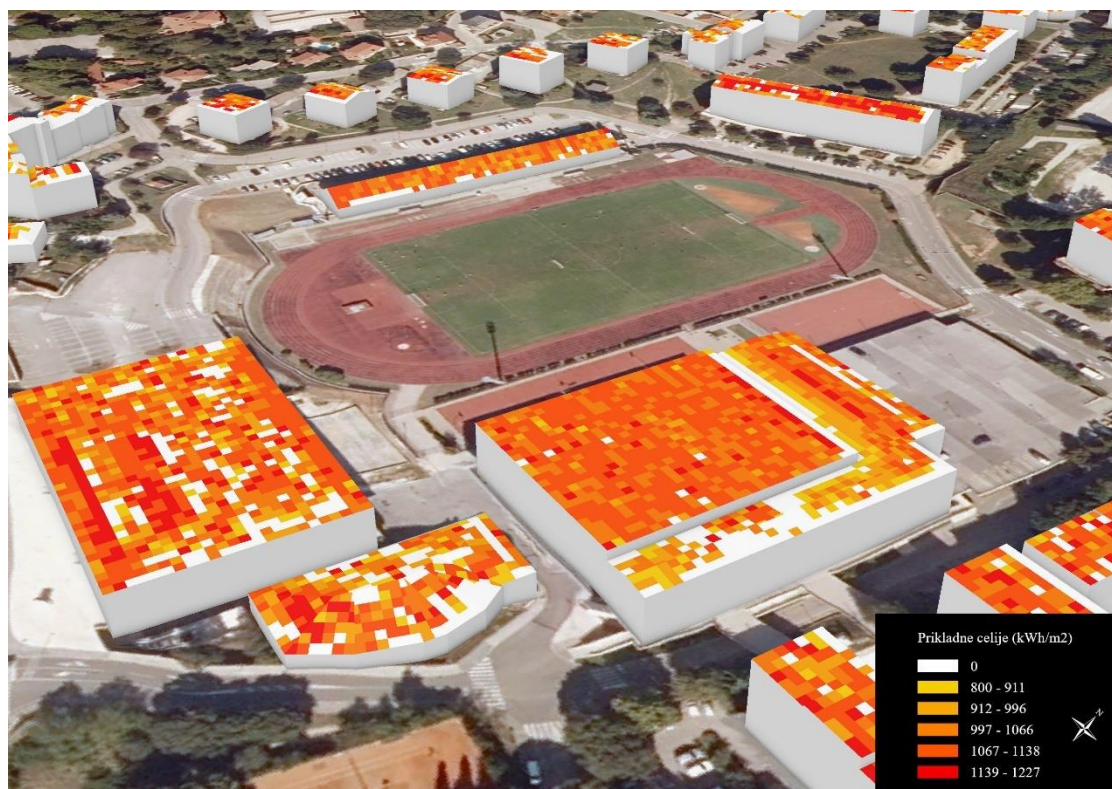
Slika 7.5. Slojevi kreirani za potrebe određivanja nagiba i orijentacije



Slika 7.6. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- prikaz sa sjeverne strane



Slika 7.7. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- prikaz s južne strane



Slika 7.8. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- Dom sportova

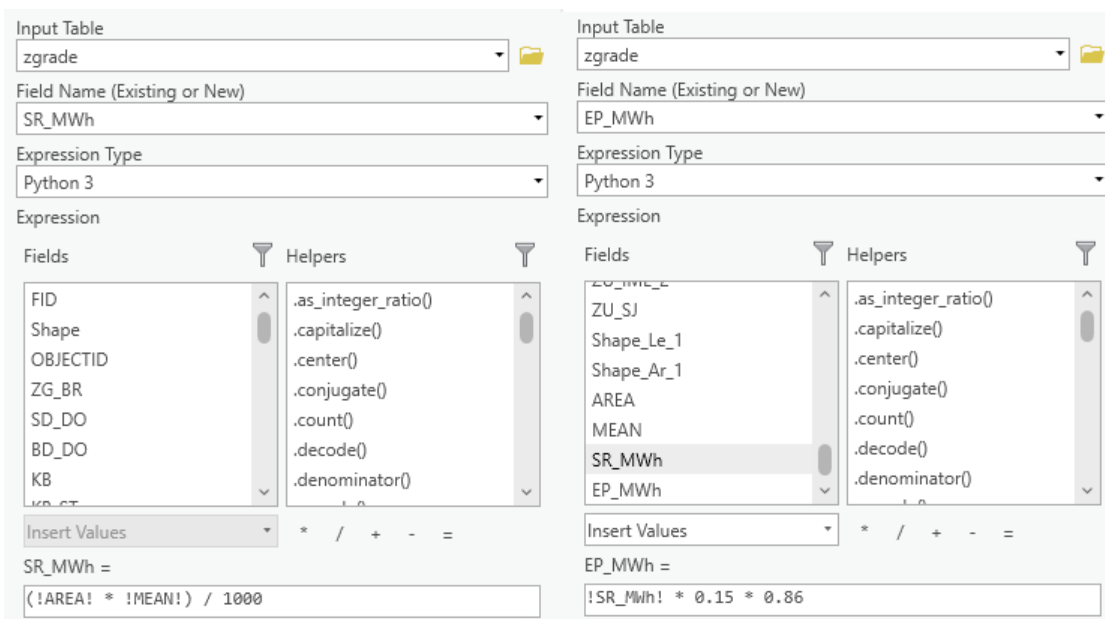
Navedeni prikazi razlikuju se od procjene količine sunčeva zračenja. Naime, vrijednosti 0 naznačene bijelom bojom pridružene su osim zidovima i pojedinim površinama krovova koje nisu zadovoljavale postavljene uvjete. Dodatno, skala boja od žute do crvene uključuje vrijednosti sunčeva zračenja pogodne za ugradnju solarnih panela. Vizualizacija provedenih uvjeta zasigurno mjerodavnije oslikava solarni potencijal i mogućnosti ugradnje fotonaponskih sustava. Pritom, jasno su vidljive razlike krovnih površina s južne i sjeverne strane. Rasterski rezultat poslužit će kao ulazna veličina za ispitivanje nastavne procjene.

### 7.1.3 Procjena proizvodnje električne energije

Prvotno, potrebno je agregirati izdvojene prikladne ćelije po površini koju zauzimaju na pojedinim krovovima zgrada. Isto tako, izračunati prosječnu količinu sunčeva zračenja izdvojenih površina. Za isto je korišten *Zonal Statistics as Table* alat. Izlazni rezultat je atributna tablica s vrijednostima ukupnog broja prikladnih ćelija, površina pokrivenih prikladnim ćelijama u m<sup>2</sup> te prosječna količina sunčeva zračenja u kWh/m<sup>2</sup> za pojedinu zgradu. Tablica je sukladno jedinstvenom identifikatoru pridružena sloju zgrade za daljnji izračun. Zatim, uveden je novi uvjet prikladnosti. Izdvojene su sve zgrade kojima ukupna površina prikladnih ćelija pokriva više od 30 m<sup>2</sup>.

Sljedeće, sloju zgrada pridruženo je nove polje izračunato *Calculate Fieldom*. Odnosi se na ukupnu količinu sunčevog zračenja koju na godišnjoj razini primi iskoristiva površina svake zgrade. Dobivene vrijednosti pretvorene su u MWh kako bi se izbjegli veliki brojevi. Konačno, novostvoreno polje poslužilo je za izračun potencijala proizvodnje električne energije. Pritom, količina energije ovisi i o dva dodatna faktora, efikasnosti solarnih panela i omjeru performansi instalacija čiji su učinci uzeti u obzir pri izračunu. Postupak kreiranja

novih polja i korištene formule prikazani su na slici 7.9. Slika 7.10. prikazuje isječak atributne tablice dobivenih rezultata poredanih po najvećim potencijalnim proizvođačima električne energije. Pritom, objekti su identificirani prema ulici i kućnom broju. Ističe se kako je među pet prvih najvećih potencijalnih proizvođača Dom sportova na adresi Trg kralja Tomislava 7. Isto tako, objekti s najvećom procjenom proizvodnje električne energije odnose se uglavnom na zgrade javne namjene. Takvi objekti imaju veće krovne površine pa samim time i veći potencijal za proizvodnju električne energije. Slika 7.11. prikazuje vizualizaciju provedenog izračuna. Crvenom bojom naznačeni su, već navedeni, najveći potencijalni proizvođači električne energije. U skladu s time, zgrade manjih krovnih površina predstavljaju manji potencijal za proizvodnju električne energije.



Slika 7.9. Calculate Field formule korištene za izračun vrijednosti novih polja

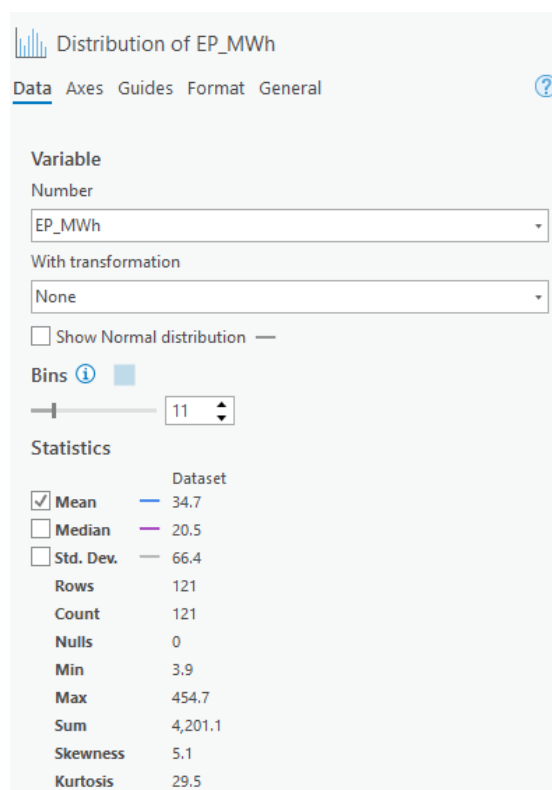
	OBJECTID *	NA_IME	UL_IME	KB	JMS_IME	SR_MWh	EP_MWh
1	47	Pula	NEGRUJEVA ULICA	6	Mjesni odbor Sv. Polikarp-Sisplac	3524.663078	454.681537
2	25	Pula	ULICA VELOG JOŽE	5	Mjesni odbor Veruda	3307.447268	426.660698
3	100	Pula	ULICA VELOG JOŽE	1	Mjesni odbor Veruda	2882.922355	371.896984
4	98	Pula	TRG KRALJA TOMISLAVA	7	Mjesni odbor Veruda	1421.547888	183.379678
5	30	Pula	ULICA VELOG JOŽE	3	Mjesni odbor Veruda	1340.246878	172.891847

Slika 7.10. Isječak atributne tablice potencijalnih proizvođača električne energije

Dodatno, koristeći *Statistics* proveden je proračun energije koju bi moglo proizvesti cijelo testno područje. Statistika varijable električne energije prikazana je na slici 7.12. Pritom, potencijalna količina proizvedene električne energije testnog područja iznosi 4201 MWh navedena pod *Sum*.



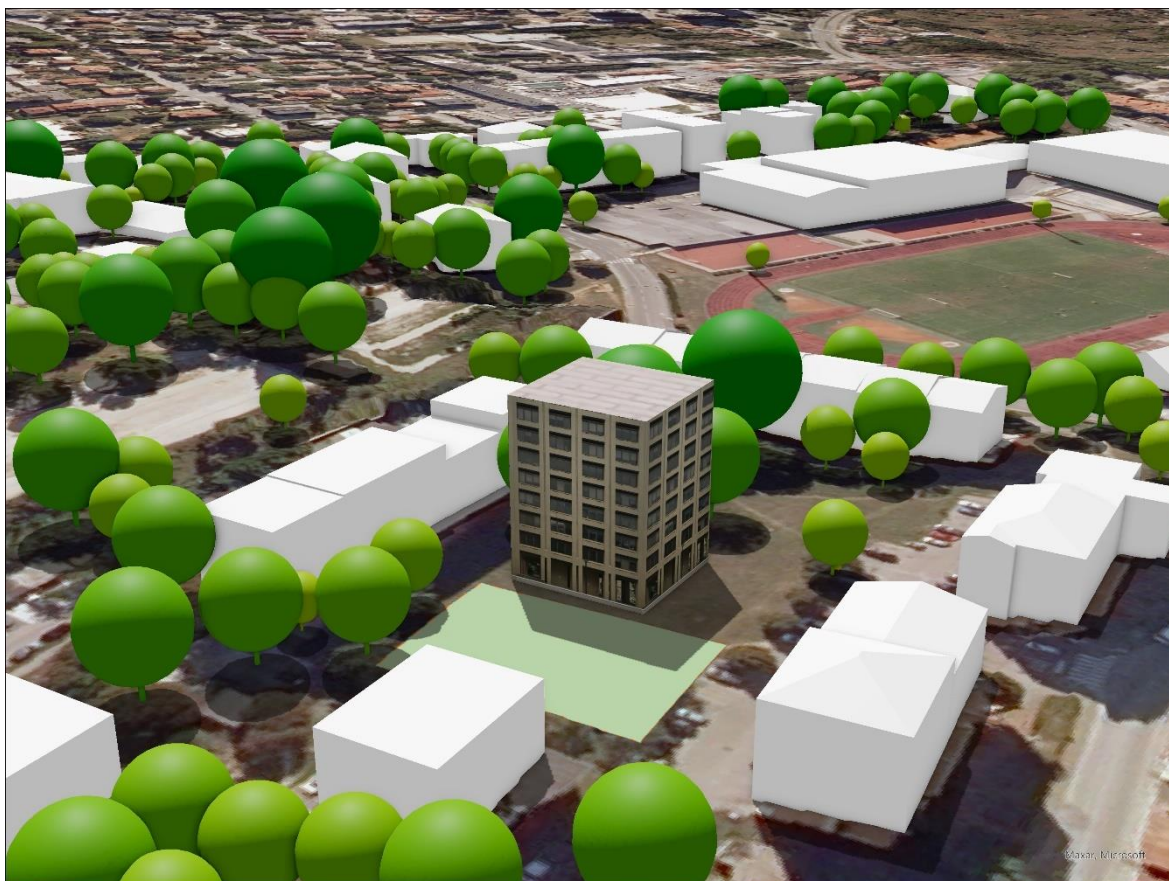
Slika 7.11. Distribucija potencijalne proizvodnje električne energije po zgradama



Slika 7.12. Statistika varijable električne energije

## 7.2 ANALIZA UTJECAJA SJENA PLANIRANOG OBJEKTA

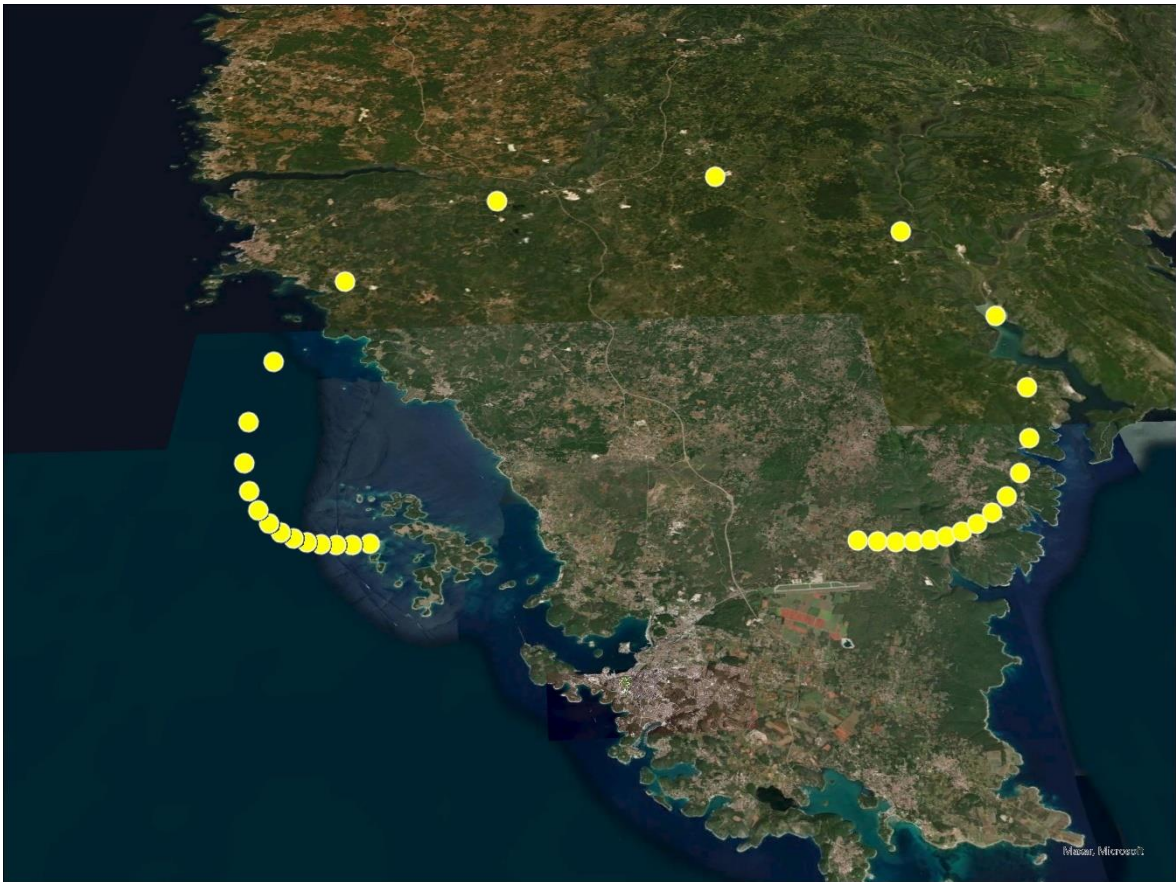
Uz ispitivanje solarnog potencijala, analiza utjecaja sjena također je jedna od simulacija ispitivanja utjecaja sunčeve svjetlosti u izgrađenoj okolini. Pritom, *Shadow Impact Analysis* rješenje nudi niz alata koji omogućuju određivanje procjene utjecaja sjene postojećih i planiranih objekata na okolnu zajednicu. U tu svrhu kreirana je višekatnica, pretpostavljen planirani razvoj na određenoj lokaciji. Isto tako, za testiranje potencijalnog utjecaja sjene pretpostavljenog objekta ucrtano je područje parka poligonalnog oblika. Slika 7.13. prikazuje okruženje kreiranog planiranog razvoja.



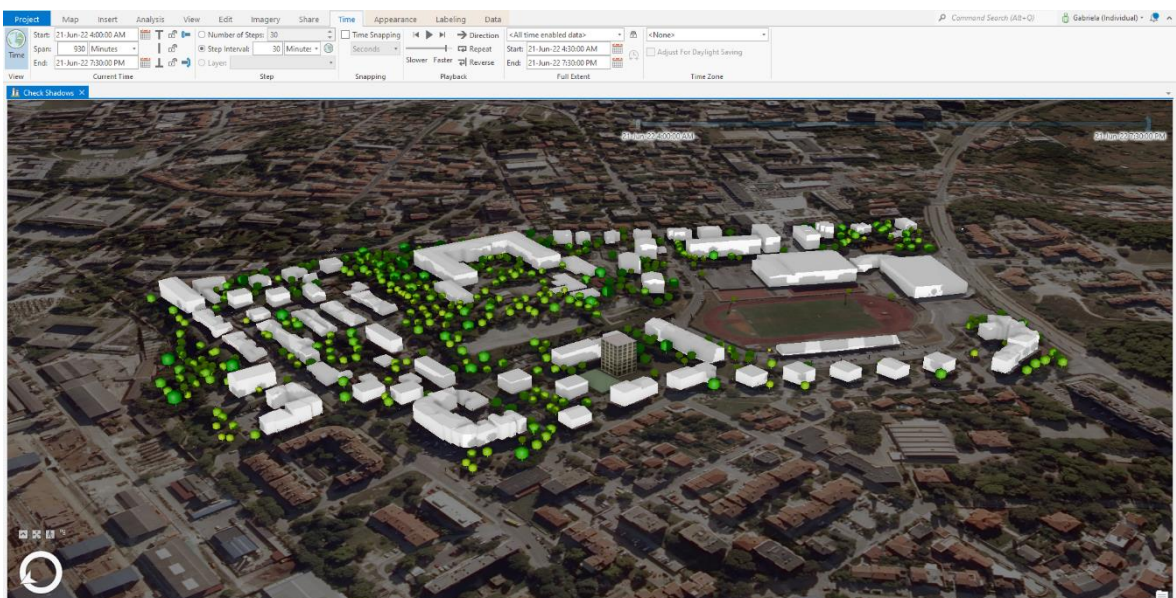
Slika 7.13. Potencijalni prostorni razvoj za ispitivanje utjecaja sjene

### 7.2.1 Procjena sjena

Cilj provođenja analize je predvidjeti sjene koje stvara predložena planirana zgrada na interesnom području u različita doba dana. Koristeći *Create Sun Positions* generirane su pozicije Sunca za odabrani datum 22. lipnja 2022. godine. Pozicije Sunca prikazane na slici 7.14. određene su na temelju izračunatog azimuta i vertikalnog kuta. U postavkama novostvorenog sloja pridruženo je vrijeme u prikladnoj vremenskoj zoni za svaku izračunatu poziciju. Nadalje, na temelju pozicija Sunca stvorena je kratka video animacija sjena. Primjer sučelja postavljanja animacije s vremenskom trakom prikazuje slika 7.14. Trajanje animacije postavljeno je na 10 sekundi. Isto tako, animaciju je moguće izvesti u niz različitih formata. Za potrebe izrade ovog rada, animacija je izvezena lokalno u .mp4 formatu.

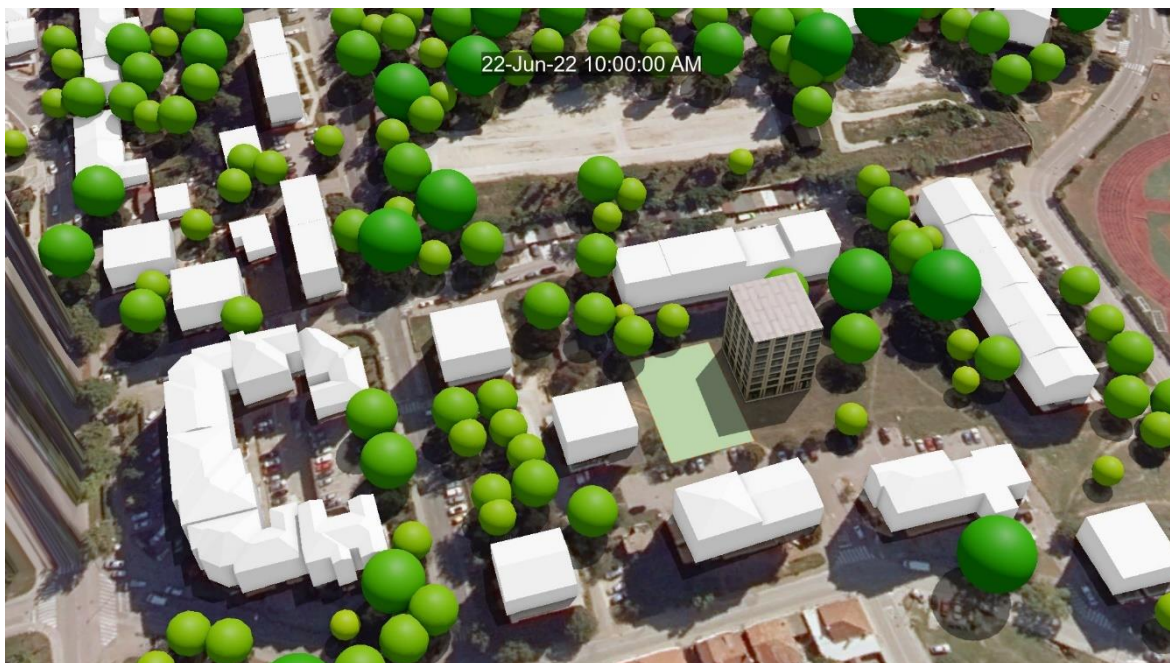


Slika 7.14. Pozicije Sunca za datum 22. lipnja 2022. godine

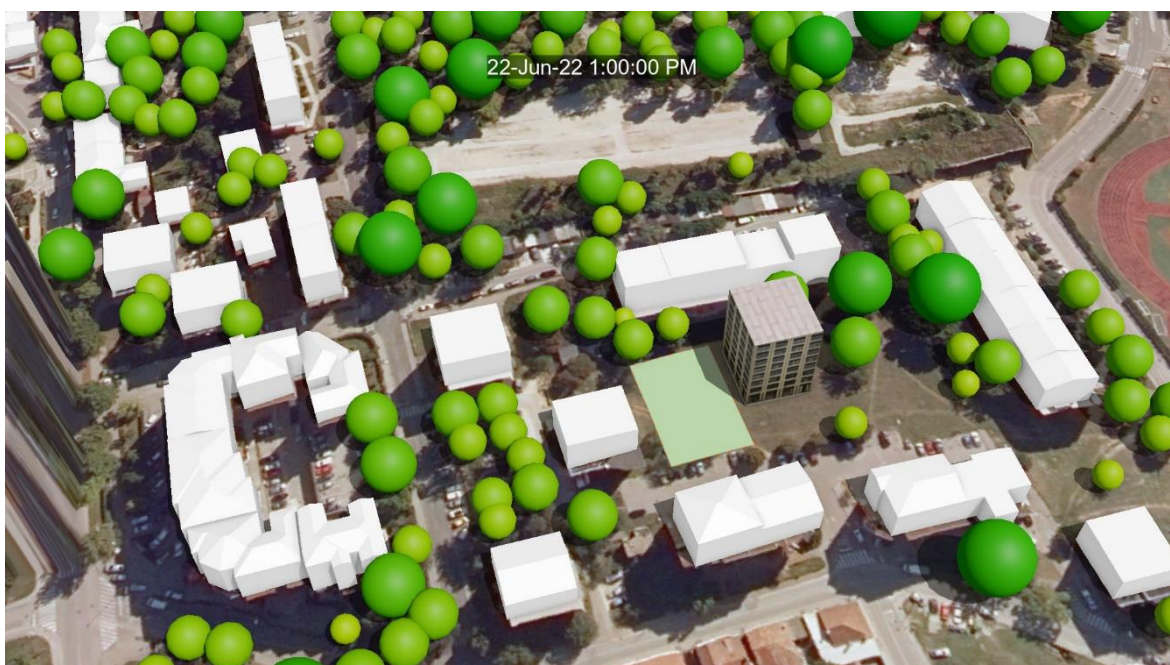


Slika 7.15. Sučelje postavljanja video animacije u korištenom softveru

Nadalje, izvezene su i sekvencijalne slike procjene sjene u.jpg formatu za svaku poziciju Sunca na dan 22. lipnja 2022. godine. Provedena analiza je prikazana za tri različita doba dana. Slika 7.16. prikazuje procjenu sjene u 10 sati, slika 7.17. u 13 sati, dok slika 7.18. prikazuje procjenu sjene u 18 sati.



*Slika 7.16. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 10 sati*



*Slika 7.17. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 13 sati*

Prikazi ukazuju na procjenu sjene putem različitih grafičkih prikaza u određeno doba dana. Iako rezultati analize pružaju samo vizualnu usporedbu, prednost procjene je lakoća pregleda. U samo nekoliko poteza moguće je dodavati te mijenjati predložene objekte te vizualno ispitivati utjecaj njihovih sjena na okolno područje interesa. Ispitivanje utjecaja sjena na uspostavljenim digitalnim blizancima gradova donosi značajne koristi lokalnoj zajednici. Posebice se to očituje u gusto naseljenim urbanim područjima gdje postoji tendencija izgradnje novih građevinskih objekata.

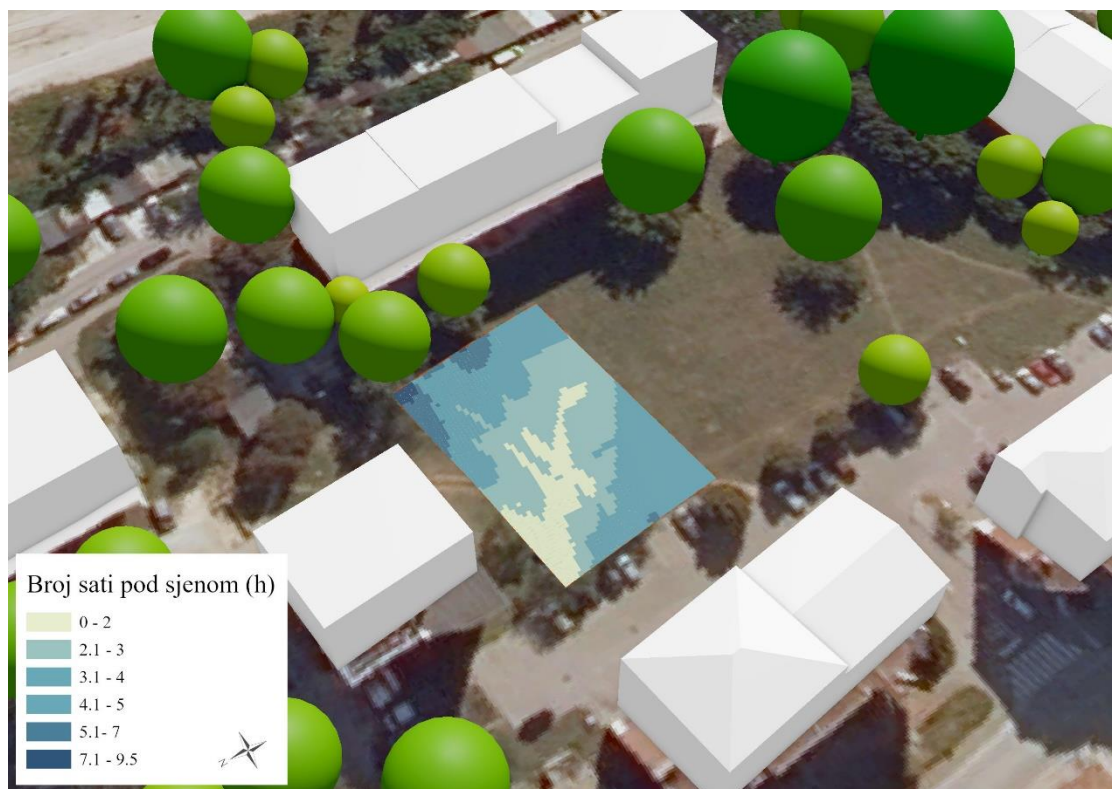


Slika 7.18. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 18 sati

### 7.2.2 Analiza sjena

Analitički izračun koji daje temeljitiju sliku utjecaja sjene planiranog razvoja omogućen je korištenjem *Analyze Shadows* modula. Sljedeći postavljene zahtjeve dobivena je površina i kumulativno vremensko trajanje sjene uzrokovane pretpostavljenim izgrađenim objektom. Pritom, razdoblje interesa definirano je pozicijama Sunca za dan 22. lipnja 2022. godine. Cilj provođenja analize je usporediti utjecaje sjene između različitih uvjeta. Potrebno je provesti analizu za dva scenarija, postojeći i predloženi razvoj. *Analyze Shadows* zadatak je vremenski zahtjevniji u odnosu na prethodno izvedeni. Pritom, samo trajanje analize ovisi o veličini zadanih površinskih jedinica parka. Konkretno, površina interesnih područja parka za ispitivanja utjecaja sjene postavljena je na 0,5 m.

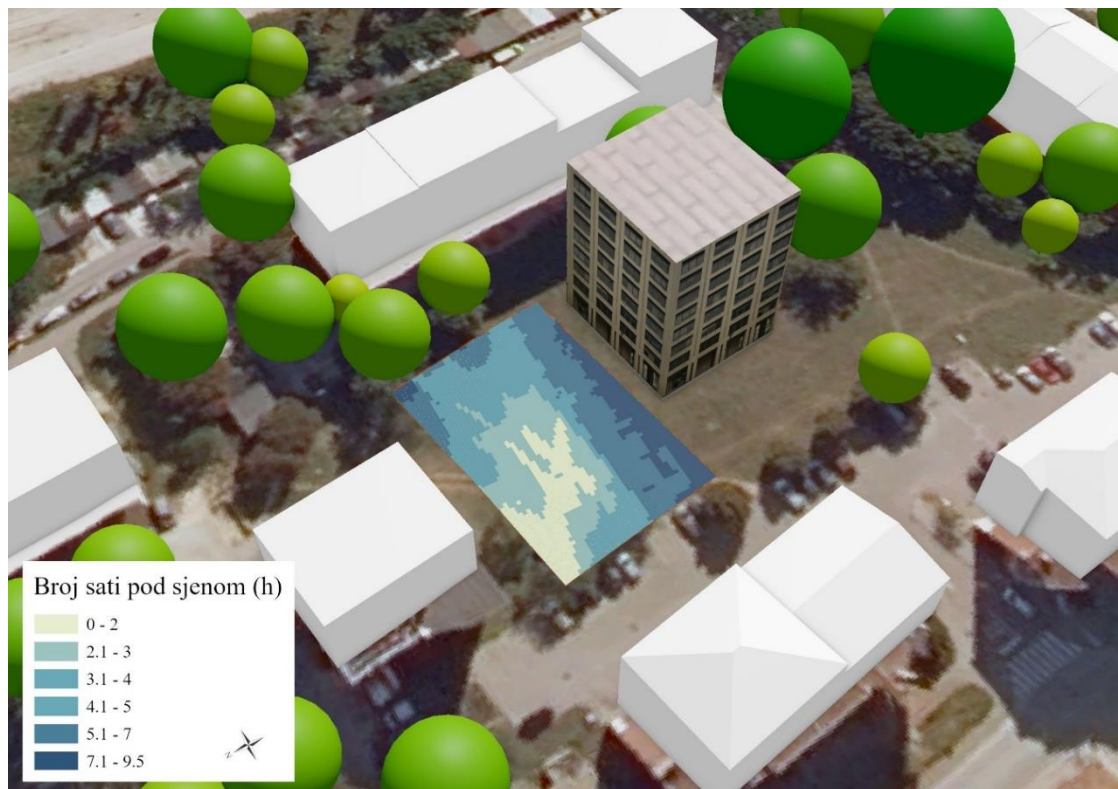
Prvotno je model izveden za postojeće stanje, uzimajući u obzir postojeće zgrade i stabla kao objekte koji uzrokuju sjene na području parka. Rezultat provedene analize je sloj koji prikazuje sate u kojima je interesna površina u sjeni. Slika 7.19. prikazuje površinu parka vizualiziranu skalom boja sukladno broju sati pod sjenom. Najsvjetliji tonovi odnose se na područje parka koje je najmanje u sjeni. Nadalje, tamnije nijanse ukazuju na postojanje okolnih zgrada i stabala koji duži period tijekom dana uzrokuju sjenu. Pritom, obris sjene upućuje o kojem se objektu radi.



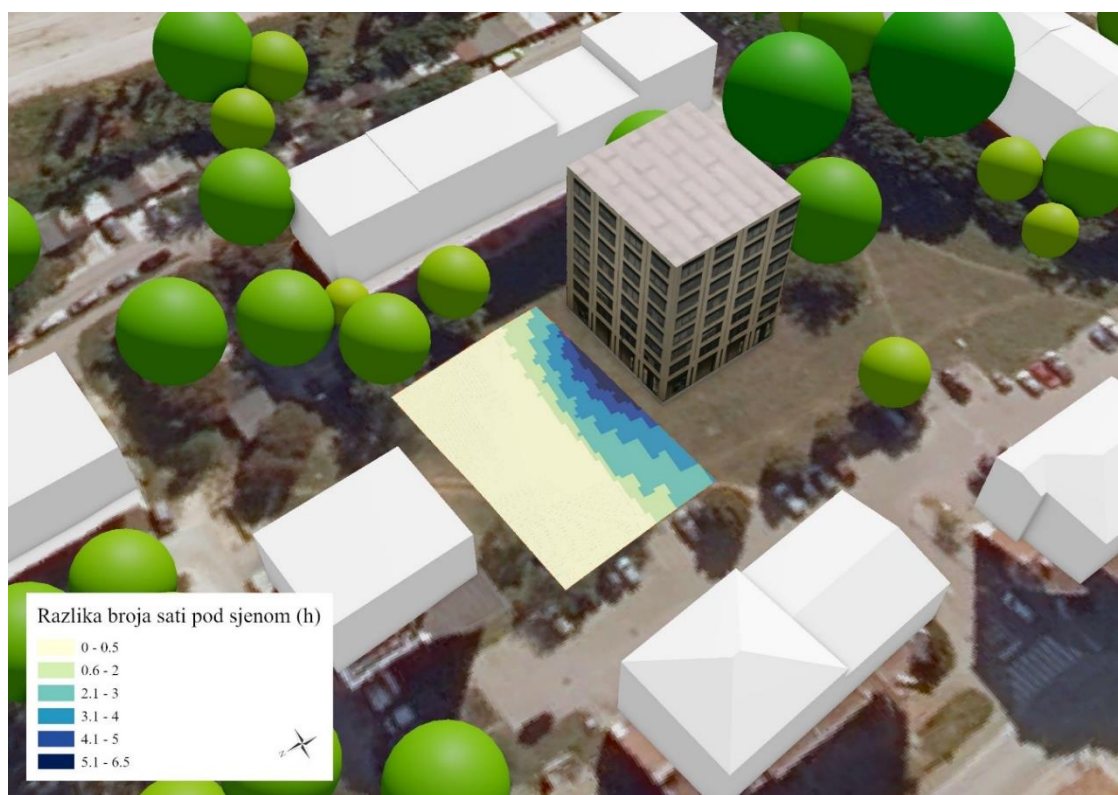
Slika 7.19. Broj sati u sjeni za postojeće stanje na dan 22. lipnja 2022. godine

Sljedeće, cilj je odrediti potencijalni utjecaj sjene planiranog objekta. Analiza je provedena uključujući pritom planirani objekt kao mogući izvor sjene. Rezultat provedene analize je sloj koji prikazuje sate u kojima je interesna površina u sjeni slijedom svih objekata koji sklanjaju sunčevu svjetlost. Rezultat provedene analize prikazan je na slici 7.20. Tako je moguće vizualno usporediti dva sloja sjene i uočiti razlike. Granice razreda postavljene su na iste vrijednosti kako bi vizualna usporedba bila lakša. Prepoznatljivi obrisi koji su prisutni u prvom prikazu, zadržavaju svoj oblik i nakon druge provedene analize. Točnije, područja nisu promijenila vrijeme tijekom dana za kojeg su u sjeni. Dok, simbologija južnog dijela parka ukazuje na promjenu nastalu sukladno potencijalno izgrađenom objektu. Posebice dijelovi koji su usko uz planiranu zgradu sadrže najveće trajanje površine koja je pod sjenom tijekom 22. lipnja 2022. godine.

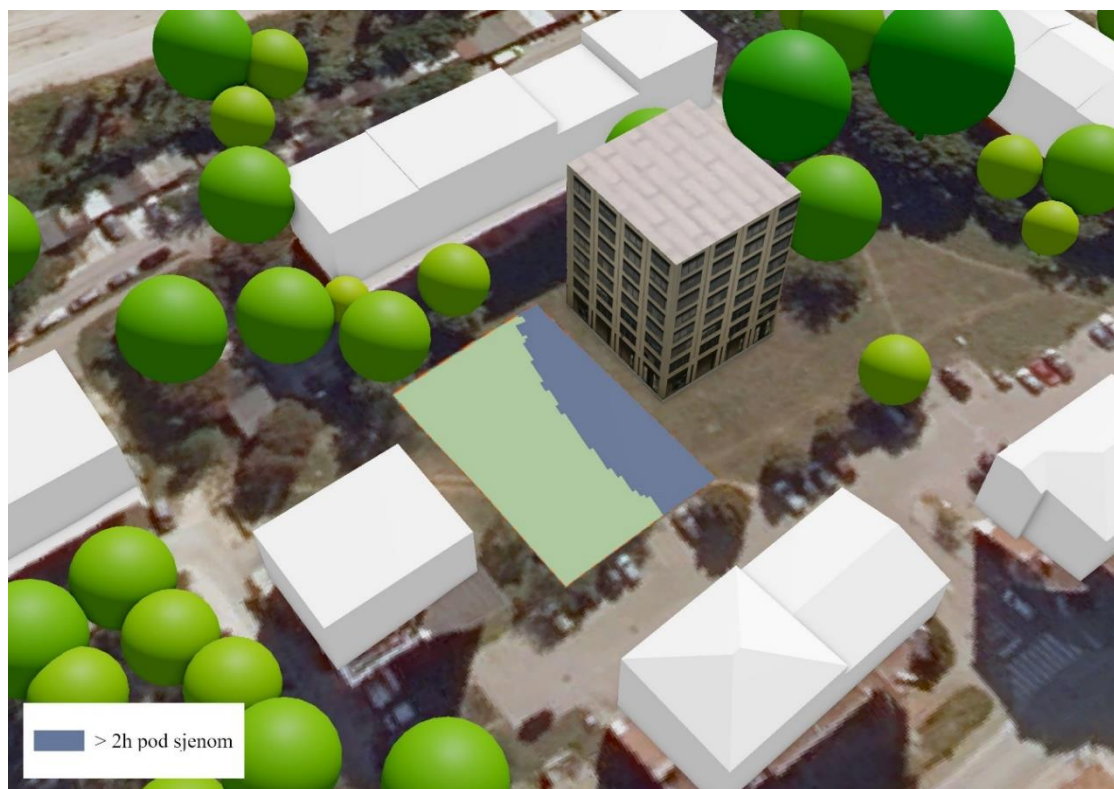
Nadalje, *Compare Shadows* opcija omogućuje bolju indikaciju razlika u sjeni između dva scenarija. Slika 7.21. ukazuje na razliku broja sati područja u sjeni između dva scenarija. Sve površinske jedinice osim južnih svojom bojom ne ukazuju na dodatan broj sati u sjeni, jer su isti objekti prisutni u oba uvjeta. Zatim, najveća razlika u broju sati od 6,5 vezana je uz potencijalni planirani objekt na jugu. Konačno, moguće je odrediti površinu koja je pod sjenom više od postavljenog broja sati. Pritom je korišten *Calculate Shadow Areas* za određivanje površine koja je više od dva dodatna sata pod sjenom izazvanom planiranim razvojem. Izračunata površina podudara se s već provedenim analizama koje ukazuju na utjecaj planirane zgrade na okolne površine. Slika 7.22. prikazuje površinu parka koja je na dan 22 lipnja 2022. godine pod sjenom planiranog objekta više od 2 sata.



Slika 7.20. Broj sati u sjeni za planirani razvoj na dan 22. lipnja 2022. godine



Slika 7.21. Dodatan broj sati u sjeni uzrokovan potencijalnom zgradom



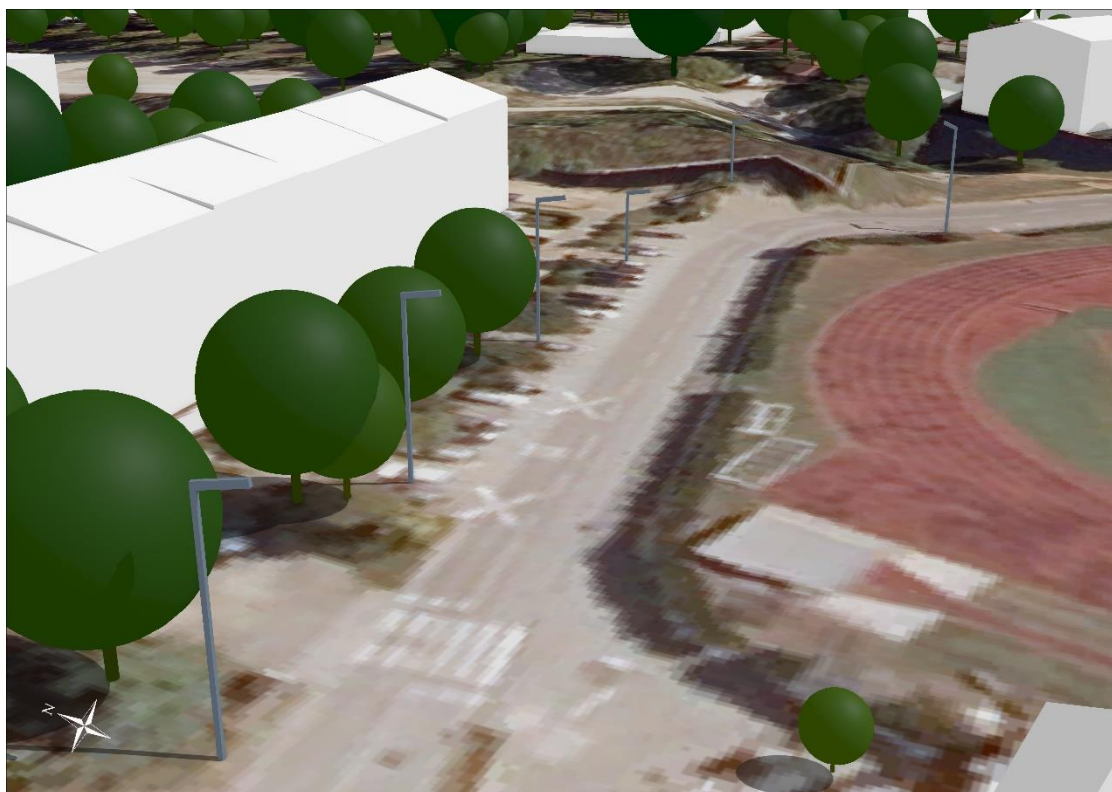
*Slika 7.22. Povšina u sjeni više od 2h uzrokovano potencijalnom zgradom*

### 7.3 ANALIZA DOMETA SENZORA RASVJETNIH TIJELA

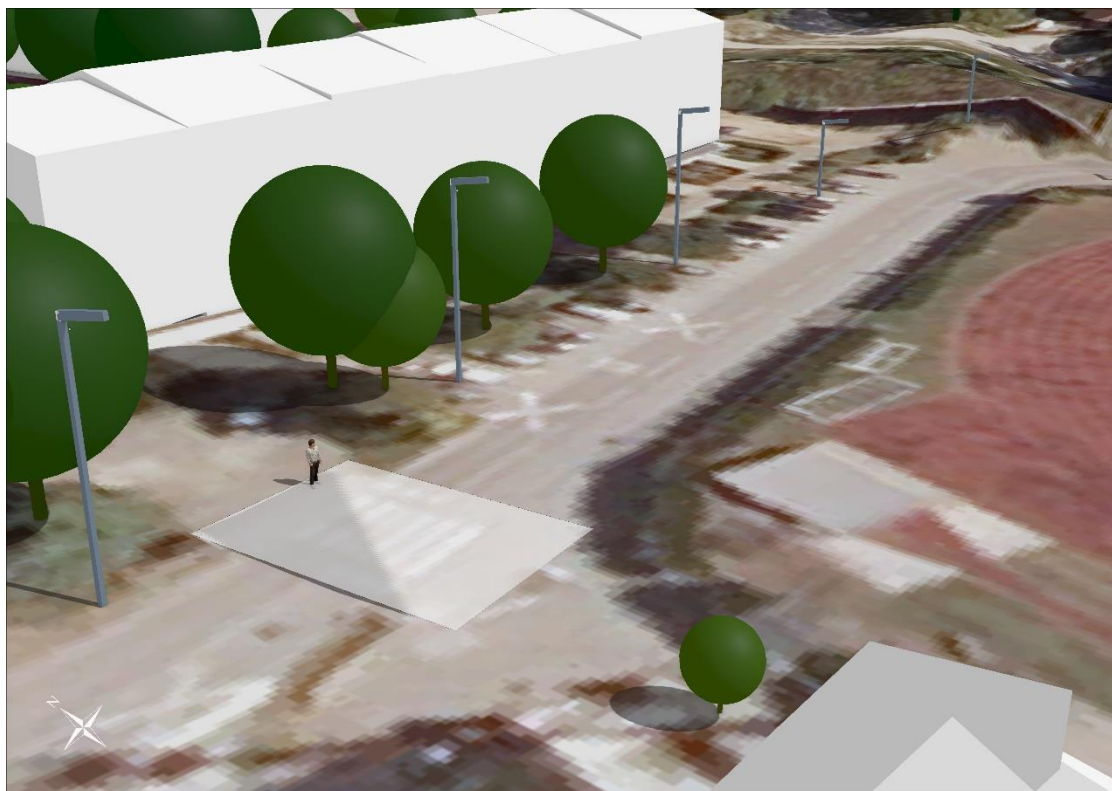
Za Grad Pulu, modernizacija javne rasvjete predstavlja jednu od ključnih mjera postizanja ciljeva energetske učinkovitosti u razdoblju od 2022. do 2024. godine. Mapiranje postojećih rasvjetnih tijela, povezivanje atributnih podataka te postavljanje u 3D virtualno okruženje već je značajan korak pri efektivnom realiziranju projekta. Modernizacija javne rasvjete uključuje postavljanje pametne LED rasvjete. Ugrađeni senzori pritom omogućuju inteligentno upravljanje javnom rasvjetom, ostvarivanje ušteda te donošenje ekološki prihvatljivih rješenja.

Cilj provođenja analize je odrediti optimalnu lokaciju i specifikacije senzora pokreta za pokrivanje područja od interesa. Postavljanje senzora s optimalnom lokacijom i specifikacijama uklanja područja sa smanjenom ili dvostrukom pokrivenošću. Senzor pokreta se unutar inteligentnog sustava upravljanja javnom rasvjetom automatski aktivira kada se u blizini nalazi pješak ili automobil. Digitalni dvojnik pritom predstavlja podlogu za interaktivne prostorne analize scene kroz ispitivanja različitih scenarija. *Viewshed* alat je konfiguracija koju lokalne vlasti mogu koristiti za odgovore na različita pitanja vidljivosti i dometa unutar zajednice. Alat omogućuje kreiranje grafika te uređivanje parametara analize u realnom vremenu.

Za ispitivanje dometa senzora rasvjetnih tijela odabrano je testno područje pješačkog prijelaza u blizini stadiona (slika 7.23.). Dodatno, kreiran je poligon koji predstavlja širu zonu lokacije pješačkog prijelaza, lokacije senzora te 3D simbol pješaka za stvaranje animacije prikazano (slika 7.24).



Slika 7.23. Pješački prijelaz- interesno područje



Slika 7.24. Pješak i poligon zona pješačkog prijelaza

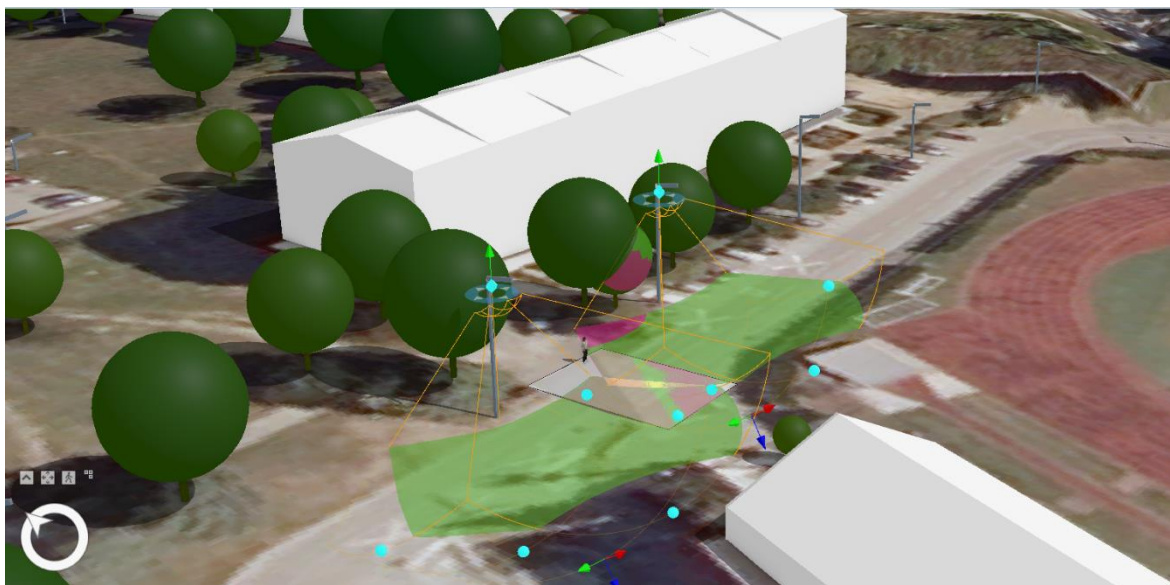
*Viewshed* opcija korištena je za postavljanje parametara dometa lokacija senzora dvaju susjednih rasvjetnih tijela na ciljnu površinu pješačkog prijelaza. Parametri analize- kutovi vidnog polja senzora, smjer dometa i doseg dometa služe za modeliranje lokacije i performansi senzora. Izrađena su dva dometa, sukladno dvije lokacije senzora, kako bi se identificirala područja koja su bez ili imaju dvostruku pokrivenost. Prikaz dometa klasificiran je u tri boje. Zelena boja predstavlja područje u dometu senzora, magenta područje van dometa te žuta boja područje koje je višestruko pokriveno sensorom pokreta.

Zatim, animacija kretanja pješaka po pješačkom prijelazu omogućena je stvaranjem linijskog sloja rute. Linija je potom podijeljena na manje segmente koji su pretvoreni u točke kako bi se mogla dodijeliti 3D simbolizacija. Novostvorenom sloju je omogućen *Range* sukladno rednim brojevima segmenata. Potom, kreirana je animacija kretanja pješaka po pješačkom prijelazu s prikazanim dometima senzora pokreta dvaju susjednih rasvjetnih tijela. Isječci animacije klasificiranih prikaza dometa senzora i pozicija pješaka na početku, sredini i s druge strane pješačkog prijelaza prikazani su na slikama 7.25., 7.26. i 7.27.

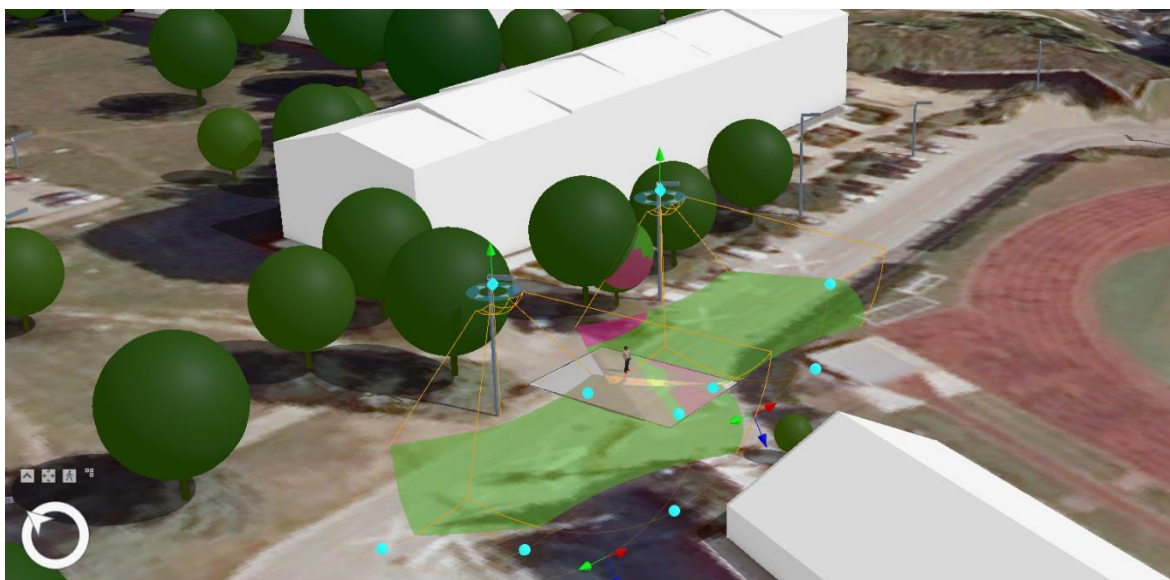
Na temelju zadanih postavki početna pozicija pješaka na pješačkom prijelazu prikazana na slici 7.25. ne ulazi u područje analize. S druge strane, kako se pješak kreće po pješačkom prijelazu ulazi u područje razmatranja te se u sredini (slika 7.26.) nalazi na području koje je dvostruko pokriveno sensorima pokreta. Nadalje, pozicija pješaka s druge strane pješačkog prijelaza (slika 7.27.) nalazi se van dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela. Alat omogućuje interaktivno mijenjanje zadanih postavki senzora čime se mijenja i grafička vizualizacija dometa. Na slici 7.28. prikazane su prvotno zadane specifikacije senzora te sukladno vizualnom prikazu, promijenjene postavke kako bi se zadovoljili uvjeti pokrivenosti. Isto tako, navedena je klasifikacija boja prikaza. Dobiveni rezultat nakon unosa novih vrijednosti

prikazan je na slici 7.29. Moguće je primijetiti kako početna pozicija pješaka sada ulazi u područje dometa senzora, ali su se također povećala područja s dvostrukom pokrivenošću.

Tako je moguće manipulirati parametrima analize te primati povratne vizualne informacije u stvarnom vremenu u sceni. Pronalaženje najbolje lokacije te performansi senzora za zadovoljavanje određenih čimbenika donosi značajne koristi lokalnoj zajednici. Ako u interesnom području nije zabilježena aktivnost, svjetlo se automatski postavlja na optimiziranu minimalnu razinu osvjetljenja. Tako se ostvaruju značajne uštede energije te doprinosi smanjenju svjetlosnog onečišćenja.



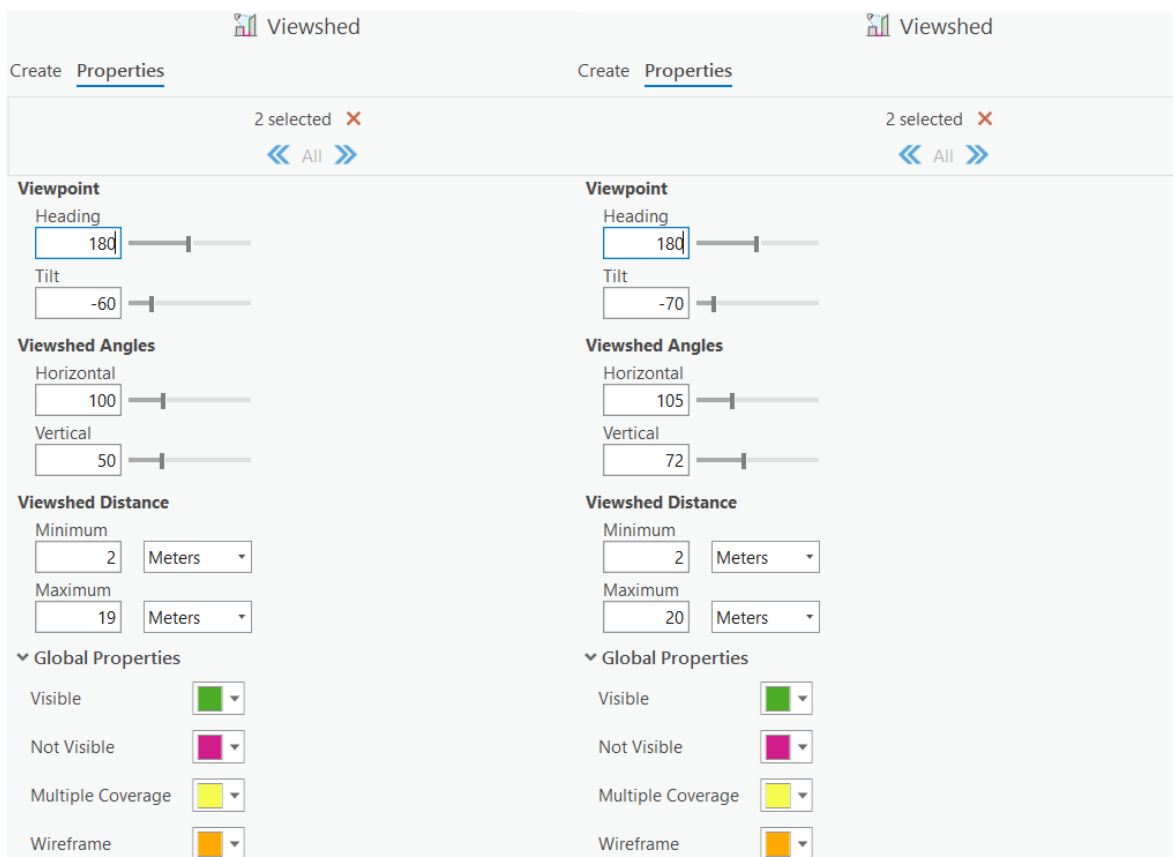
*Slika 7.25. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak na početku pješačkog prijelaza*



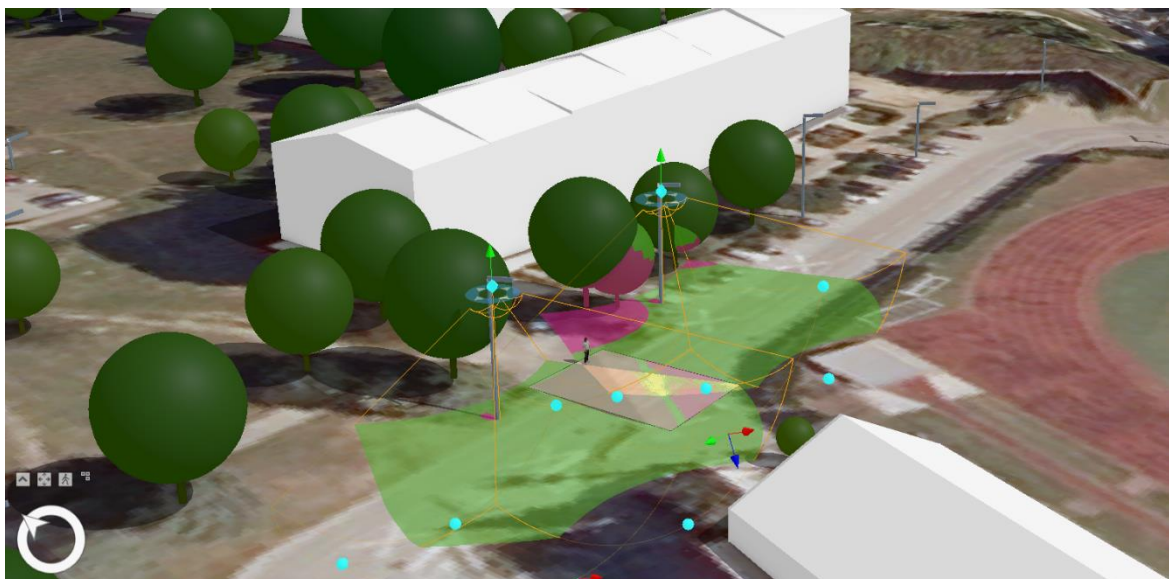
*Slika 7.26. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak u sredini pješačkog prijelaza*



Slika 7.27. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak s druge strane pješačkog prijelaza



Slika 7.28. Postavljene specifikacije senzora i klasifikacija boja prikaza



*Slika 7.29. Domet senzora pokreta rasvjetnih tijela nakon promjene početnih parametara*

## 8. ZAKLJUČAK

Koncept digitalnog blizanca najnoviji je koncept u geoprostornom segmentu i kao takav, još uvijek u nastajanju i razvojnoj fazi. Pritom, uspostavljeni 3D model je temelj digitalnog blizanca, ključnog pokretača digitalne transformacije urbanih sredina. Kroz ograničeni set podataka testnog područja odabrane četvrti grada Pule pokazan je potencijal uspostave okosnice digitalnog blizanca. Stvoreno virtualno okruženje služi kao simulacijska platforma za provođenje različitih ispitivanja i analiza. U kontekstu postizanja globalnih politika održivog razvoja pristupljeno je planiranim mjerama energetske učinkovitosti Grada Pule.

Konkretno, ispitana je primjena digitalnog blizanca pri ispitivanju solarnog potencijala krovova zgrada, utjecaja planiranog razvoja na okolinu te mjere modernizacije javne rasvjete. Tako stvorena virtualna platforma poslužila je za identifikaciju krovnih površina koje su pogodne za solarizaciju te simulacijski prikaz uštede električne energije. Zatim, kroz analizu predikcije utjecaja sunčeve sjene planiranog objekta, pokazan je značaj digitalnog blizanca u urbanom planiranju. Dodatno, putem vizualizacije dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela omogućen je novi pristup optimizaciji potrošnje energije u javnoj rasvjeti. Pokazujući tako mogućnosti digitalnog dvojnika za postizanje racionalnije potrošnje energije kontrolirajući javnu rasvjetu.

Provedene analize ispitivanja različitih scenarija urbanih procesa temeljene su na postojećim podacima i prostorno ograničenom području. Testna ispitivanja ovog rada mogu poslužiti za uspostavu digitalnog blizanca na razini čitavog grada. Pri čemu, relevantnosti modela te pouzdanosti potom provedenih simulacija značajno može pridonijeti prikupljanje podataka koristeći nova tehnološka rješenja. Kako bi model imao svojstvo ažuriranosti, nužno je integrirati i informacije koje su dio IoT tehnologije. Zatim, ključna je suradnja gradskih vlasti sa svim zainteresiranim dionicima kroz osiguravanje otvorenih podataka. Također, pružanjem visoko kvalitetnih virtualnih kopija, dostupnih građanima putem web platforme, stvara se dodatna vrijednost za rješavanje izazova složene urbane sredine.

Konačno, zadaća gradskih vlasti je učiniti prve korake ka integraciji tehnologije digitalnih blizanca kao podloge za razumijevanje složenih urbanih analitika. Digitalni bliznac urbanih područja služi kao podrška u odlučivanju i postepenom, dugoročnom održivom razvoju. Pritom, kroz provođenje održivih politika, prvenstveno putem povećanja energetske učinkovitosti, ostvaruju se značajne ekonomske koristi. Poboľšane ekonomske prilike zatim povećavaju globalnu konkurentnost gradova. Stoga, inovativni pristupi pametnih gradova ostvaruju prosperitet urbanih sredina, a u konačnici bolju kvalitetu života građana.

## LITERATURA

- Buntak, K., Brlek, P., Biškup, N. i Cesarec, B., (2021), Digitalni gradovi blizanci, 5TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PROFESSIONAL CONFERENCE: The Challenges of Today, pp. 453-462.  
[http://www.kresimir-buntak.com/Radovi/2021/Digitalni%20gradovi%20blizanci.pdf?fbclid=IwAR0IpHiyzIav9pRw4Ac7QZGLx3etlca7VAVg0llzDZeY5TuOWxvrVRT\\_ngs](http://www.kresimir-buntak.com/Radovi/2021/Digitalni%20gradovi%20blizanci.pdf?fbclid=IwAR0IpHiyzIav9pRw4Ac7QZGLx3etlca7VAVg0llzDZeY5TuOWxvrVRT_ngs),  
(10.6.2022.)
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A. i Lozoya-Santos, J., (2022), Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review, Remote Sensing, 14 (6), 1335.  
<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/6/1335>,  
(10.6.2022.)
- Caragaliu, A., Del Bo, C. i Nijkamp, P., (2009), Smart Cities in Europe, Journal of Urban Technology, 18 (48), pp. 45-59.  
[https://www.researchgate.net/publication/46433693\\_Smart\\_Cities\\_in\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/46433693_Smart_Cities_in_Europe),  
(9.6.2022.)
- Chen, A., (2017), Integrated and intelligent manufacturing: Perspectives and enablers, Engineering, 3 (5), pp. 588–595.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009>,  
(9.6.2022.)
- Glaessgen, E. H. i Stargel, D.S., (2012), The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles, 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin,  
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>,  
(9.6.2022.)
- Grieves, M., (2016), Origins of the Digital Twin Concept,  
[https://www.researchgate.net/publication/307509727\\_Origins\\_of\\_the\\_Digital\\_Twin\\_in\\_Concept](https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_in_Concept),  
(9.6.2022.)
- Grubišić, F., (2014), Geospatial Science and Technology towards a Sustainable Future and Development, Ekscentar, 17, pp. 77-81.  
[https://www.researchgate.net/publication/267632084\\_Geospatial\\_Science\\_and\\_Technology\\_towards\\_a\\_Sustainable\\_Future\\_and\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/267632084_Geospatial_Science_and_Technology_towards_a_Sustainable_Future_and_Development),  
(9.6.2022.)
- Guo, J., Lv, Z., (2022), Application of Digital Twins in multiple fields, Multimedia Tools and Applications,  
<https://doi.org/10.1007/s11042-022-12536-5>,

(9.6.2022.)

Ivanov, S., Nikolskaya, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L. i Zymbler, M., (2020), Digital Twin of City: Concept Overview, 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), pp. 178-186.

[https://www.researchgate.net/publication/347550330\\_Digital\\_Twin\\_of\\_City\\_Concept\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/347550330_Digital_Twin_of_City_Concept_Overview),

(10.6.2022.)

Narodne novine (2021), Nacionalna razvojna strategija Republike Hrvatske do 2030. godine, Zagreb: Narodne novine d.d., 13.

[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_02\\_13\\_230.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_02_13_230.html),

(21.5.2022.)

Nevistić, Z. i Bačić, Ž., (2022), The Concept, Realizations and Role of Geosciences in the Development of Smart Cities, Tehnički vjesnik, 29 (1), pp. 330-336.

<https://hrcak.srce.hr/269607>,

(9.6.2022.)

Petrova-Antonova, D. i Ilieva, S., (2020), Digital twin modeling of smart cities, International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies, pp. 384-390.

[https://www.researchgate.net/publication/343482156\\_Digital\\_Twin\\_Modeling\\_of\\_Smart\\_Cities](https://www.researchgate.net/publication/343482156_Digital_Twin_Modeling_of_Smart_Cities),

(10.6.2022.)

Rahman, I. i Tadayoni, R., (2018), Digital Transformation of Automobiles - from product to service, 2018 11th CMI International Conference: Prospects and Challenges Towards Developing a Digital Economy within the EU, pp. 7-13.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8624883>,

(10.6.2022.)

Ruohomäki, T., Kesäniemi, O., Airaksinen, E., Martikka, M., Huuska, P. i Suomisto, J., (2018), Smart City Platform Enabling Digital Twin, 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), pp. 155-161.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8710517>,

(10.6.2022.)

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchey, E. P., Qiao, Y., Murray, N. i Devine, D., (2021), Digital Twin: Origin to Future, Appl. Syst. Innov, 4.

<https://doi.org/10.3390/asi4020036>,

(9.6.2022.)

Stark R. i Damerou T., (2019), Digital Twin, The International Academy for Production Engineering, Chatti S., Tolio T. (eds), CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer: Berlin, Heidelberg, pp. 1-8.

[https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7\\_16870-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1),

(10.6.2022.)

- United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UN-DESA), Population Division (2019), World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420), New York: United Nations.  
<https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf>,  
(21.5.2022.)
- United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) (2020), World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization, Nairobi: UN- Habitat.  
[https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr\\_2020\\_report.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf),  
(21.5.2022.)
- Yadav, G., Mangla, S. K., Luthra, S. i Rai D. P., (2019), Developing a sustainable smart city framework for developing economies: An Indian context, Sustainable Cities and Society, 47 (101462),  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101462>,  
(9.6.2022.)
- Vrabič, R., Erkoyuncu, J. A., Butala, P. i Roy, R., (2018), Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services, Procedia Manufacturing, 16, pp. 139-146,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918312897>,  
(9.6.2022.)
- White, G., Zink, A., Codecá, L., i Clarke, S., (2021), A digital twin smart city for citizen feedback, Cities, 110, 103064.  
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>,  
(10.6.2022.)
- Wirsinna, A., (2021), SCENTIA INTERNATIONAL ECONOMIC REVIEW: The Evaluation of Economic Benefits of Smart City Initiatives – A Category Approach, 1 (1).  
<https://www.scentia-review.com/index.php/SIER/article/view/4/5>,  
(9.6.2022.)
- Wirsinna, A. i Grega, L., (2021), Assessment of Economic Benefits of Smart City Initiatives, Cuadernos de Economía, Volume 126 (44), pp. 45-56.  
[https://cude.es/submit-a-manuscript/index.php/CUDE/article/view/206/190?fbclid=IwAR0RM\\_r7eFcPGRtf\\_vT-NMfrepdxn-9sEpAsIDXn\\_19Wrwj8CpY3nff0eKQ](https://cude.es/submit-a-manuscript/index.php/CUDE/article/view/206/190?fbclid=IwAR0RM_r7eFcPGRtf_vT-NMfrepdxn-9sEpAsIDXn_19Wrwj8CpY3nff0eKQ),  
(9.6.2022.)
- Zhang, X., Shen, J., Saini, P. K., Lovati, M., Han, M., Huang, P., i Huang, Z. (2021), Digital twin for accelerating sustainability in positive energy district: a review of simulation tools and applications, Frontiers in Sustainable Cities, 3, 35.  
<https://doi.org/10.3389/frsc.2021.663269>,  
(20.6.2022.)

## POPIS URL-ova

- URL 1. Što čini neki grad Pametnim gradom?, <https://www.digitalizacija-hrvatske.info/sto-cini-neki-grad-pametnim-gradom>, (21.5.2022.)
- URL 2. Smart cities, [https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities\\_en](https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en), (9.6.2022.)
- URL 3. Top 5 Smart City Companies, <https://itchronicles.com/smart-city/top-5-smart-city-companies>, (9.6.2022.)
- URL 4. What Is a Smart City?, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/industries/smart-connected-communities/what-is-a-smart-city.html>, (9.6.2022.)
- URL 5. WHAT IS A SMART CITY? – DEFINITION AND EXAMPLES, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-smart-city>, (9.6.2022.)
- URL 6. Global smart city platform market to reach \$755m by 2027, <https://internetofbusiness.com/global-smart-city-platform-market/>, (9.6.2022.)
- URL 7. World's No 1 Smart City for 2022: Shanghai, <https://www.juniperresearch.com/press/worlds-no-1-smart-city-for-2022-shanghai>, (9.6.2022.)
- URL 8. 10 Ways Smart Cities Will Restructure The Economy, [https://interestingengineering.com/10-ways-smart-cities-will-restructure-the-economy?fbclid=IwAR2\\_6YnX-hfBfCH3erR4sZ289x9sPIUf8-hqU0nzc-P-UinXihmMeq\\_Ee0I](https://interestingengineering.com/10-ways-smart-cities-will-restructure-the-economy?fbclid=IwAR2_6YnX-hfBfCH3erR4sZ289x9sPIUf8-hqU0nzc-P-UinXihmMeq_Ee0I), (9.6.2022.)
- URL 9. ROLE OF SMART CITIES FOR ECONOMIC DEVELOPMENT, <https://www.caba.org/wp-content/uploads/2020/04/IS-2018-215.pdf>, (9.6.2022.)
- URL 10. Smart cities: redefining urban energy, [https://www.power-technology.com/analysis/smart-cities-redefining-urban-energy/?fbclid=IwAR2g2KF84LGAgSa\\_bajDMoDor87uwtibyVV-v5SHVHYAInQLU2SaULRD\\_tXY](https://www.power-technology.com/analysis/smart-cities-redefining-urban-energy/?fbclid=IwAR2g2KF84LGAgSa_bajDMoDor87uwtibyVV-v5SHVHYAInQLU2SaULRD_tXY), (9.6.2022.)
- URL 11. What made Shanghai the world's No.1 Smart City?, <https://www.citiesforum.org/news/what-made-shanghai-the-worlds-no-1-smart-city/>, (9.6.2022.)
- URL 12. How China Cloned Shanghai, <https://www.theblm.com/video/how-china-cloned-shanghai>, (9.6.2022.)
- URL 13. Top smart cities in Europe, <https://www.computerworld.com/article/3412276/top-smart-cities-in-europe.html#slide4>, (9.6.2022.)
- URL 14. BARCELONA SMART CITY STRATEGY: AN EVER EVOLVING PLAN, <https://suitelife.com/barcelona-real-estate/barcelona-smart-city-strategy/>, (9.6.2022.)

- URL 15. What is a Digital Twin?, <https://www.iotforall.com/what-is-digital-twin-technology>, (9.6.2022.)
- URL 16. Digital Twins and Living Models at NASA, <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210023699>, (9.6.2022.)
- URL 17. Apollo 13: The First Digital Twin, <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>, (9.6.2021.)
- URL 18. Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019, <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>, (9.6.2022.)
- URL 19. From vehicle design to multi-physical simulations, <https://new.siemens.com/global/en/markets/automotive-manufacturing/digital-twin-product.html>, (9.6.2022.)
- URL 20. Deploying the Hybrid Twin to Aid the Automotive Industry's Digital Transformation, <https://www.esi-group.com/blog/deploying-the-hybrid-twin-to-aid-the-automotive-industrys-digital-transformation>, (10.6.2022.)
- URL 21. The critical role of virtual twins in accelerating sustainability, <https://www.3ds.com/sites/default/files/2021-01/dassault-systemes-and-accenture-virtual-twin-and-sustainability.pdf>, (10.6.2022.)
- URL 22. What Is a Digital Twin?, <https://blogs.nvidia.com/blog/2021/12/14/what-is-a-digital-twin/>, (10.6.2022.)
- URL 23. NVIDIA Blazes Markets With Powerful New Tech For AI, The Metaverse, Autonomous Vehicles And More <https://www.forbes.com/sites/davealtavilla/2021/11/09/nvidia-blazes-markets-with-powerful-new-tech-for-ai-the-metaverse-autonomous-vehicles-and-more/?sh=1d0f82791857>, (10.6.2022.)
- URL 24. Digital Twin application in Healthcare, <https://medium.com/@yashbajaj900/digital-twin-application-in-healthcare-69bf4c0f87e7>, (10.6.2022.)
- URL 25. Blue Brain Project, <https://www.epfl.ch/research/domains/bluebrain/>, (10.6.2022.)
- URL 26. THE LIVING HEART PROJECT, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/solutions/life-sciences-healthcare/the-living-heart-project/>, (10.6.2022.)
- URL 27. Best Digital Twin Applications & Use Cases in Healthcare in 2022, <https://research.aimultiple.com/digital-twin-healthcare/>, (10.6.2022.)
- URL 28. Destination Earth, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>, (10.6.2022.)
- URL 29. Digital Twin Earth, [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/09/Digital\\_Twin\\_Earth](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/09/Digital_Twin_Earth), (10.6.2022.)

- URL 30. Digital Twin Market, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>, (20.6.2022.)
- URL 31. Bentley Systems, Microsoft and Schneider Electric re-imagine future workplaces with sensors, sustainability, IoT and AI, <https://news.microsoft.com/en-sg/2020/03/12/bentley-systems-microsoft-and-schneider-electric-re-imagine-future-workplaces-with-sensors-sustainability-iot-and-ai/>, (20.6.2022.)
- URL 31. Virtual Singapore, <https://www.nrf.gov.sg/programmes/virtual-singapore>, (20.6.2022.)
- URL 32. Digital twins to save urban planners US\$280 billion, <https://futurecio.tech/digital-twins-to-save-urban-planners-us280-billion/>, (20.6.2022.)
- URL 33. Clean Cities- Clean Future, <https://cityzenith.com/clean-cities-clean-future-campaign>, (20.6.2022.)
- URL 34. COVID-19 expected to drive adoption of city digital twins, <https://cities-today.com/covid-19-expected-to-drive-adoption-of-city-digital-twins/>, (10.6.2022.)
- URL 35. Meet Virtual Singapore, the city's 3D digital twin, <https://govinsider.asia/digital-gov/meet-virtual-singapore-citys-3d-digital-twin/>, (20.6.2022.)
- URL 36. HDB Greenprint, <https://www.hdb.gov.sg/cs/infoweb/about-us/our-role/smart-and-sustainable-living/hdb-greenprint>, (20.6.2022.)
- URL 37. Digital twins to design the city of the future, <https://www.sacyr.com/en/-/gemelos-digitales-para-diseniar-la-ciudad-del-futuro>, (20.6.2022.)
- URL 38. Smart Kalasatama – Smart city district of Helsinki, <https://fiksukalasatama.fi/en/smart-city/>, (20.6.2022.)
- URL 39. The Kalasatama Digital Twins Project, [https://www.hel.fi/static/liitteet-2019/Kaupunginkanslia/Helsinki3D\\_Kalasatama\\_Digital\\_Twins.pdf](https://www.hel.fi/static/liitteet-2019/Kaupunginkanslia/Helsinki3D_Kalasatama_Digital_Twins.pdf), (20.6.2022.)
- URL 40. 2017: Kalasatama, <https://kartta.hel.fi/3d/mesh/Kalasatama/>, (20.6.2022.)
- URL 41. Helsinki, <https://kartta.hel.fi/3d/#/>, (20.6.2022.)
- URL 42. In focus: Energy efficiency in buildings, [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17\\_en](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17_en), (20.6.2022.)
- URL 43. Positive Energy Districts (PED), <https://jpi-urbaneurope.eu/ped/>, (20.6.2022.)
- URL 44. Grad Pula u top 5 najboljih pametnih gradova, <https://www.pula.hr/hr/vodici/medunarodna-suradnja/odsjeku/novosti/detail/21394/grad-pula-u-top-5-najboljih-pametnih-gradova/>, (20.6.2022.)
- URL 45. Najavljena opskrba električnim vozilom u pješačkim zonama kao i novi sustav organizacije i naplate parkiranja, <https://www.pula.hr/hr/novosti/detail/23453/najavljena-opskrba-elektricnim->

- [vozilom-u-pjesackim-zonama-kao-i-novi-sustav-organizacije-i-naplate-parkiranja/](#), (20.6.2022.)
- URL 46. Grad pokreće solarizaciju Pule, [https://www.pula.hr/hr/novosti/detail/23194/grad-pokrece-solarizacijupule/?fbclid=IwAR3pJ1E8DkOY\\_n3OdDjn2wSrZmBGGgVtd5po87UN2kMPxSTdRZK9fCUCTMg](https://www.pula.hr/hr/novosti/detail/23194/grad-pokrece-solarizacijupule/?fbclid=IwAR3pJ1E8DkOY_n3OdDjn2wSrZmBGGgVtd5po87UN2kMPxSTdRZK9fCUCTMg), (20.6.2022.)
- URL 47. Nacrt Akcijskog plana energetske učinkovitosti Grada Pule za razdoblje od 2022. do 2024. godine, <https://www.pula.hr/hr/eusluge/ekonzultacije/završene-ekonzultacije/75/nacrt-akcijskog-plana-energetske-ucinkovitosti-grada-pule-za-razdoblje-od-2022-do-2024-godine/>, (20.6.2022.)
- URL 48. QGIS, <https://www.qgis.org/en/site/>, (28.6.2022.)
- URL 49. Spatial Analysis (Interpolation), [https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle\\_gis\\_introduction/spatial\\_analysis\\_interpolation.html](https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html), (28.6.2022.)
- URL 50. ArcGIS: The Foundation for Digital Twins, <https://www.esri.com/en-us/ig/industry/infrastructure/arcgis-the-foundation-for-digital-twins>, (28.6.2022.)
- URL 51. Use 3D Basemaps, <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-solutions/10.9/reference/use-3d-basemaps.htm>, (28.6.2022.)
- URL 52. Extract 3D buildings using photogrammetry, <https://learn.arcgis.com/en/projects/extract-3d-buildings-using-photogrammetry/>, (28.6.2022.)
- URL 53. Tree Detection, <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=4af356858b1044908d9204f8b79ced99>, (28.6.2022.)
- URL 54. Aligning 3D Street Furniture to Street Networks, <https://community.esri.com/t5/3d-blog/aligning-3d-street-furniture-to-street-networks/ba-p/901697>, (28.6.2022.)

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Projekcija urbane populacije svijeta, razvijenih i manje razvijenih regija od 1950. do 2050. (UN-DESA, 2019).....	2
Slika 2.2 Koncept pametnog grada (URL 6).....	4
Slika 2.3. Digitalni blizanac Shanghaja (URL 12) .....	7
Slika 2.4. Primjena pametne javne rasvjete u Barceloni (URL 14).....	8
Slika 3.1. Model zcraljenja informacija (Guo i Lv, 2022) .....	10
Slika 3.2. Apollo simulatori kontrolne misije u Houstonu (URL 17).....	11
Slika 3.3. Digitalni blizanac automobila (URL 20).....	12
Slika 3.4. NVIDIA Virtualna stvarnost (URL 23).....	13
Slika 3.5. Digitalni blizanac pacijenta (URL 24) .....	14
Slika 3.6. Digitalni blizanac neokorteksa miša (URL 25) .....	14
Slika 3.7. Digitalni blizanac Zemlje kao podloga donošenju odluka (URL 28) .....	16
Slika 4.1. Koncept digitalnog blizanca na razini grada (Buntak i dr., 2021) .....	18
Slika 4.2. Globalna karta primjene digitalnog blizanca grada (Botín-Sanabria i dr., 2022) .....	19
Slika 4.3. Višeslojna struktura digitalnog blizanca grada (White i dr., 2021) .....	21
Slika 4.4. Isječak platforme digitalnog blizanca Singapura (URL 35).....	23
Slika 4.5. Virtualni Singapur kao podloga za ispitivanje utjecaja vjetrova (URL 37) .....	24
Slika 4.6. Isječak reality mesh modela Kalasatame (URL 40).....	26
Slika 4.7. Isječak web prikaza 3D informacijskog modela Kalasatame (URL 41) .....	26
Slika 4.8. Digitalni blizanac kao simulacijska platforma za utjecaje vjetrova i sunca (URL 39) .....	27
Slika 6.1. Područje grada Pule i prostorna podjela na popisne krugove .....	32
Slika 6.2. Popisni krugovi od interesa i testno područje .....	33
Slika 6.3. Aerofotogrametrijski snimci koji sadrže testno područje.....	34
Slika 6.4. Sučelje Agisoft softvera s naznačenim postavljenim kontrolnim markerima .....	35
Slika 6.5. Rijetki oblak točaka interesnog područja .....	35
Slika 6.6. Gusti oblak točaka interesnog područja .....	36
Slika 6.7. Digitalni model površine interesnog područja.....	36
Slika 6.8. Ortomozaik interesnog područja .....	37
Slika 6.9. Vektorski oblik digitalnog modela reljefa .....	38
Slika 6.10. Rasterski oblik digitalnog modela reljefa .....	38
Slika 6.11. Ortomozaik testnog područja.....	39

Slika 6.12. DSM testnog područja .....	40
Slika 6.13. nDSM testnog područja .....	40
Slika 6.14. Dio atributne tablice sloja zgrade.....	41
Slika 6.15. Dio atributne tablice sloja rasvjeta .....	41
Slika 6.16. Vektorski podaci testnog područja.....	42
Slika 6.17. Mogući tipovi krovova i unesene postavke (URL 51) .....	43
Slika 6.18. Razine detaljnosti 3D modela zgrada (URL 52) .....	43
Slika 6.19. 3D model zgrada testnog područja.....	44
Slika 6.20. 3D model zgrada s karakteristikama krova.....	44
Slika 6.21. Dio atributne tablice stvorenog 3D sloja zgrada .....	45
Slika 6.22. Postavke Tree Detection modela.....	45
Slika 6.23. Detektirana stabla u obliku poligona.....	46
Slika 6.24. Dio atributne tablice sloja stabla .....	46
Slika 6.25. Detektirana stabla u obliku točaka .....	47
Slika 6.26. 3D model stabala.....	47
Slika 6.27. Relativni odnos 3D stabala .....	47
Slika 6.28. Korišteni kod za definiranje boja i dio atributne tablice sloja rasvjeta .....	48
Slika 6.29. Parametri uspostave 3D modela rasvjetnih tijela .....	48
Slika 6.30. 3D model rasvjetnih tijela.....	49
Slika 6.31. Rotacija 3D rasvjetnih tijela.....	49
Slika 6.32. Konačan izgled okosnice digitalnog blizanca testnog područja .....	50
Slika 6.33. Uvećan prikaz okosnice digitalnog blizanca testnog područja .....	51
Slika 6.34. Uvećan prikaz uspostavljenog 3D modela testnog područja .....	51
Slika 7.1. Rezultat provedenog sjenčanja na DSM-u .....	52
Slika 7.2. Procjena količine sunčeva zračenja za 2022. godinu- prikaz sa sjeverne strane .53	
Slika 7.3. Procjena količine sunčeva zračenja za 2022. godinu- prikaz s južne strane .....	54
Slika 7.4. Procjena količine sunčeva zračenja- Dom sportova za 2022. godinu.....	54
Slika 7.5. Slojevi kreirani za potrebe određivanja nagiba i orijentacije .....	55
Slika 7.6. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- prikaz sa sjeverne strane .....	56
Slika 7.7. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- prikaz s južne strane .56	
Slika 7.8. Površine krovova prikladne za ugradnju solarnih panela- Dom sportova.....	57
Slika 7.9. Calculate Field formule korištene za izračun vrijednosti novih polja.....	58

Slika 7.10. Isječak atributne tablice potencijalnih proizvođača električne energije.....	58
Slika 7.11. Distribucija potencijalne proizvodnje električne energije po zgradama .....	59
Slika 7.12. Statistika varijable električne energije.....	59
Slika 7.13. Potencijalni prostorni razvoj za ispitivanje utjecaja sjene.....	60
Slika 7.14. Pozicije Sunca za datum 22. lipnja 2022. godine.....	61
Slika 7.15. Sučelje postavljanja video animacije u korištenom softveru.....	61
Slika 7.16. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 10 sati.....	62
Slika 7.17. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 13 sati.....	62
Slika 7.18. Procjena sjene interesnog područja na dan 22.6.2022. u 18 sati.....	63
Slika 7.19. Broj sati u sjeni za postojeće stanje na dan 22. lipnja 2022. godine .....	64
Slika 7.20. Broj sati u sjeni za planirani razvoj na dan 22. lipnja 2022. godine .....	65
Slika 7.21. Dodatan broj sati u sjeni uzrokovan potencijalnom zgradom.....	65
Slika 7.22. Povšina u sjeni više od 2h uzrokovano potencijalnom zgradom .....	66
Slika 7.23. Pješački prijelaz- interesno područje.....	67
Slika 7.24. Pješak i poligon zona pješačkog prijelaza .....	68
Slika 7.25. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak na početku pješačkog prijelaza .....	69
Slika 7.26. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak u sredini pješačkog prijelaza .....	69
Slika 7.27. Animacija dometa senzora pokreta rasvjetnih tijela- pješak s druge strane pješačkog prijelaza.....	70
Slika 7.28. Postavljene specifikacije senzora i klasifikacija boja prikaza .....	70
Slika 7.29. Domet senzora pokreta rasvjetnih tijela nakon promjene početnih parametara	71

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1 Podaci prikupljeni za potrebe izrade rada.....	31
Tablica 6.2. Parametri pozicije kamera snimaka.....	33
Tablica 6.3. Procjena pograšaka stvorenih kontrolnih točaka.....	34