

Civil engineering Statybos inžinerija

UŽSTATYTOS APLINKOS SKAITMENINIO DVYNIŲ SAMPRATA

Eva GRIGORJEVA 

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2022 m. gegužės 15 d.; priimta 2022 m. spalio 14 d.

Santrauka. Užstatyta aplinka – tai teritorija, kurioje yra statiniai ir kiti objektai, tenkinantys žmonių poreikius. Vienas iš būdų, kaip išskirti žmonių poreikius ir realiuoju laiku juos tenkinti, – pasitelkti skaitmeninį dvynį (angl. *Digital Twin*, DT). Skaitmenizuojant statybų procesą taikoma statinio skaitmeninio modeliavimo (angl. *Building Information Modeling*, BIM) metodologija. Kai BIM taikomas nuo pat užstatytos aplinkos objekto įgyvendinimo idėjos, informacija apie objektą pradeda kaupti nuo pat objekto gyvavimo ciklo pradžios. Informacijos kaupimas apie objektą yra ypač svarbus norint išgauti geriausią DT modelio variantą. Svarbu suprasti ir tai, kad neužtenka turėti realų objektą ir skaitmeninės informacijos apie jį. Skaitmeninis dvynys veiks, jei bus užtikrinti informaciniai ryšiai tarp realios ir virtualios aplinkos.

Reikšminiai žodžiai: užstatyta aplinka, skaitmeninis dvynys, statinio informacinis modeliavimas, DT, BIM.

Įvadas

Sparčiai tobulėjančios informacinės ir komunikacijų technologijos per pastarąjį dešimtmetį padarė esminį proveržį skaitmenizuojant ir automatizuojant procesus visuose gamybos pramonės sektoriuose, taip pat ir statyboje. Skaitmenizavimas statybų sektoriuje apima ne tik statinio informacinį modeliavimą (angl. *Building Information Modeling*, BIM), bet ir geografines informacines sistemas (angl. *Geographic Information Systems*, GIS), virtualiosios ir papildytosios realybės įrankius (angl. *Virtual and Augmented Reality*), daiktų internetą (angl. *The Internet of Things*, IoT), didžiuosius duomenis (angl. *Big Data*), 3D lazerinį skenavimą (angl. *3D laser scanning*), dronus (angl. *drone*), fotogrametriją (angl. *Photogrammetry*). Manoma, kad šias technologijas taikant kartu prieinama prie skaitmeninio dvynio idėjos (angl. *Digital Twin*, DT) kūrimo ir taikymo galimybių. Plataus spektro problemoms spręsti, siekiant atsižvelgti į laiko ir aplinkos poveikio veiksnius, efektyvu pasitelkti daugiafunkčę baigtinių elementų analizę (angl. *Finite Element Method Analysis*, FEM/FEA). Analizuojant įvairius literatūros šaltinius pastebima, kad autoriai skirtingai supranta ir pristato skaitmeninio dvynio koncepciją. Skaitmeninių dvynių poreikis nebūtų atsiradęs be siekio veiksmingiau valdyti užstatytą aplinką, į kurią įeina įvairūs elementai. Tai tiesioginė sąsaja, kuri padeda tobulinti statybų sektorių.

1. Užstatytos aplinkos samprata

Analizuojant literatūros šaltinius pastebima, kad užstatyta aplinka siejama ne tik su statiniais, pastatais, infrastruktūra, kultūros paveldo objektais, žaliosiomis zonomis, bet akcentuojama ir tai, kad pagrindinis jų tikslas – tenkinti žmogaus poreikius ir užtikrinti sveikas gyvenimo sąlygas (Ubartė et al., 2016).

XX a. 10-ajame dešimtmetyje pastatams teko 40 % pasaulyje sunaudojamų medžiagų bei trečdalis pasaulyje suvartojamos energijos (Rees, 1999). Praėjus dviem dešimtmečiams, statybų sektorius vis dar yra didžiausias pasaulyje žaliavų vartotojas, o pasauliui tenkančios anglies dioksido emisijos sudaro 25–40 % (World Economic Forum, 2016). Atsižvelgiant į šias tendencijas, galima teigti, kad užstatytos aplinkos vaidmuo yra itin svarbus dėl neigiamo poveikio aplinkai, kuris taip pat suteikia ir didelių galimybių sumažinti suvartojamos energijos, šiltnamio efektą sukeliančių išmetamųjų dujų ir susidarančių atliekų kiekį (Pomponi & Moncaster, 2017).

Vienas iš būdų, kaip efektyviai valdyti užstatytą aplinką ir tenkinti žmonių poreikius, yra skaitmenizavimo diegimas kiekviename aplinkos elemente, pradedant nuo jo gyvavimo ciklo pradžios. Taip sukuriama didelė pridėtinė vertė statybų sektoriui, nes tai ne tik sumažintų projekto trukmę, jo išlaidas, bet ir padidintų projekto efektyvumą, rezultatų kokybę bei leistų siekti geresnių aplinkosaugos rodiklių.

*Autorius susirašinėti. El. paštas grigorjevaeva@gmail.com

2. Skaitmeninio dvynio koncepcija

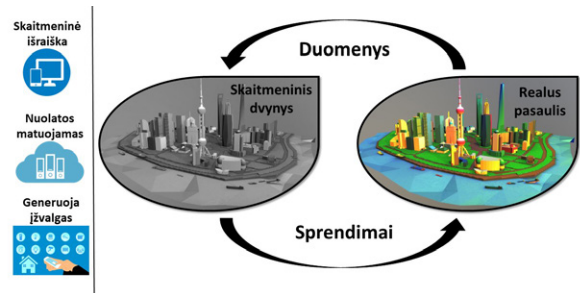
Skaitmeninio dvynio koncepcija yra daugialypė, apimanti platų apibrėžčių spektrą, priklausomai nuo taikomosios srities ir paskirties. Užstatytos aplinkos skaitmeninis dvynys gali būti nagrinėjamas kaip objektas, kaip kompleksas, kaip teritorija esamos, kuriamos arba sukurtos aplinkos sąlygomis. Nuo šių veiksmų ir jiems keliamų reikalavimų labai priklauso jo sukūrimo, vystymo būdai ir metodai.

Literatūroje nėra sutartos skaitmeninio dvynio koncepcijos apibrėžimo (Kritzinger et al., 2018; Gerber et al., 2019). Gallan ir kt. (2019) skaitmeninį dvynį apibrėžia kaip dinamišką virtualiojo fizinio objekto ar sistemos, veikiančios visą jo gyvavimo ciklą, atvaizdą, kuriam suprasiti naudojami realiojo laiko duomenys. El Saddik (2018) teigia, kad skaitmeninis dvynys yra gyvojo ar negyvojo fizinio subjekto skaitmeninė kopija. Sujungiant fizinį ir virtualųjį pasaulį, duomenys sklandžiai perduodami, todėl virtualusis subjektas gali egzistuoti kartu su fiziniu. Kitas šaltinis skaitmeninį dvynį apibrėžia kaip visų produkto gyvavimo ciklo komponentų žemėlapi, naudojant fizinius, virtualiuosius duomenis ir sąveiką tarp jų (Tao et al., 2018). Kaip matome, visuose skaitmeninio dvynio apibrėžimuose minimi trys esminiai skaitmeninio dvynio požymiai: fizinė dalis, skaitmeninė dalis ir informaciniai ryšiai tarp jų. Kitaip tariant, skaitmeninis dvynys yra skaitmeninė fizinio turto versija, o skaitmeninė dalis ir fizinė dalis yra sujungtos viena su kita abipusiais duomenų mainų ryšiais, kuriais vykdoma fizinio objekto stebėseną, priežiūra, valdymas ir sprendimų priėmimas, siekiant realiuoju laiku atliepti fizinio objekto esamus ir galimus pokyčius.

Akademinėje ir populiariojoje literatūroje apie užstatytą aplinką daugelis autorių vartoja terminą *skaitmeninis dvynys* kaip tiesioginį statinio informacinio modelio (BIM, sukurto projektavimo ir statybos etapais, sinonimą (Sacks et al., 2020). Statinio naudojimo ir priežiūros etape dažniausiai remiamasi būtent šiais BIM modeliais (Aengenvoort & Krämer, 2018; Borrmann et al., 2018; Gerber et al., 2019). Siekdami apibrėžti skirtumą tarp BIM modelio ir skaitmeninio dvynio Khajavi et al. (2019) pastebėjo, kad skaitmeninių pastatų dvynių naudojimas apsiriboja pastato eksploatavimu. Tai reiškia, kad skaitmeninis pastato dvynys skiriasi nuo skaitmeninių modelių tuo, kad turi ryšį su savo fiziniu dvyniu (Bolton et al., 2018).

Apibendrinant skaitmeninį dvynį ir jo funkcijas galima konstatuoti, kad (1 pav.):

1. Skaitmeninis dvynys yra skaitmeninis fizinio turto, proceso ar sistemos, juose esančių žmonių bei jų tarpusavio grįžtamojo ryšio atvaizdavimas, apimantis inžinerinę, aplinkos kokybę, žmogaus emocinę, afektinę ir fiziologinę būklę bei kitą informaciją apie jo aktualią būklę. Jis leidžia suprasti, modeliuoti turto elgseną ir realiuoju laiku priimti sprendimus.
2. Skaitmeninis dvynys turi būti nuolat sinchronizuojamas su savo tikru fiziniu prototipu per įvairius duomenų surinkimo šaltinius, įskaitant sensorius, jutiklius, daviklius, vaizdo sekimą, kad būtų galima stebėti ir atvaizduoti turto ir jo gyvybę palaikančių



1 paveikslas. Skaitmeninio dvynio savybės ir ryšys su tikru pasauliu (šaltinis: adaptuota iš Centre for Digital Built Britain, 2022)

Figure 1. Features and relationship to the real world of a digital twin (source: adapted from Center for Digital Built Britain, 2022)

sistemų bei juose esančių žmonių būseną, žmonių ir sistemų tarpusavio grįžtamąją sąveiką, darbo būklę ar padėtį realiuoju laiku arba artimu jam.

3. Skaitmeninis dvynys leidžia vartotojui (valdytojui ar gyventojui) vizualizuoti turtą ir juose esančių žmonių būklę, jų tarpusavio grįžtamąjį ryšį, skaitmeninėmis priemonėmis patikrinti jo būseną, atlikti analizę ir generuoti įvairias, kad būtų galima numatyti ir optimizuoti turto sistemų ir juose esančių individų našumą, efektyviai valdyti pokyčius, įskaitant elgseną kritinėse situacijose.

Sukurtos (užstatytos) aplinkos skaitmeninis dvynys reiškia skaitmeninę (informacinę) fizinio turto, procesų ar sistemų kopiją arba tiesiog jo duomenų modelį, kurį galima naudoti įvairiais tikslais. Skaitmeninis dvynys imituoja fizinį objektą visose gyvavimo ciklo operacijose – nuo ankstyvojo planavimo, conceptualaus ir detalaus projektavimo iki statybos procesų valdymo ir objekto užbaigimo, atidavimo naudoti ir naudojimo.

3. Skaitmeninio dvynio raida

Užstatytos aplinkos vienas pagrindinių objektų yra statinys ir kiti egzistuojantys objektai. Analizuojant statinio gyvavimo ciklo etapus: planavimą, projektavimą, statybą ir naudojimą, manoma, kad visuose šiuose etapuose gali būti atrandamos skaitmeninio dvynio užuomazgos, kurios, sąveikaudamos kartu, sukuria galutinį rezultatą – statinio skaitmeninį dvynį (angl. *Building Digital Twin* – BDT), tiesiogiai susijusį su aplinka.

Pirmasis statinio gyvavimo ciklo etapas – planavimas. Užsakovo poreikių, pareigų ir būsimo statinio gyvavimo ciklo valdymo planavimo prasme tai procesas, kurio metu suformuojama statinio vizija ir poreikiai, atliekami visi veiksmai, būtini prieš pradėdant projektavimą: analizuojami ir parengiami dokumentai, atliekami tyrimai, išnagrinėjamos galimybės ir alternatyvos, parengiamos techninės sąlygos ir užsakovo reikalavimai informacijai (angl. *Employer Information Requirements*, EIR). Planavimo etape galima išvystyti DT užuomazgą, nes tai yra duomenų bazės apie būsimą statinį kūrimo pradžia (.xlsx ir kt. dokumentų formatai) ir tolesnių etapų pagrindas.

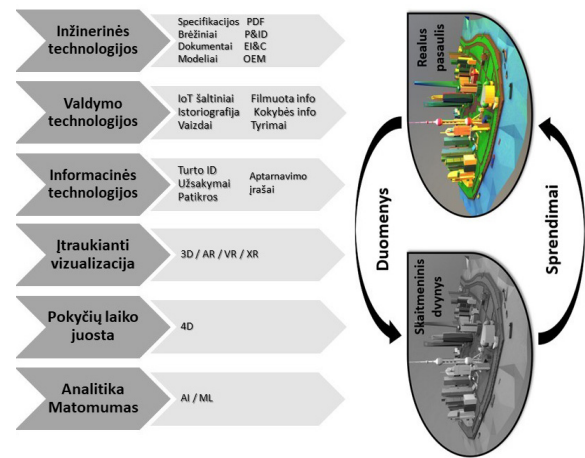
Kitas – antrasis – statinio gyvavimo ciklas yra ankstyvasis projektavimo etapas. Jis turi didžiausią įtaką projektui, nes šiame etape projekto planavimas yra lankstesnis. Kuo labiau projektas pažengia pirmyn, tuo labiau mažėja projektų pokyčių galimybė arba pokyčių atsiradimas padidina projekto sąnaudas (Burke, 2010). Statinio informacinio modeliavimo taikymas šiame statinio gyvavimo ciklo etape gali pagerinti bendrą informacijos srautą, o tai padidina projekto našumą ir kokybę. Šios metodologijos taikymas taip pat leidžia padidinti projekto skaidrumą, skatina bendradarbiavimą tarp suinteresuotų šalių ir padeda išvengti klaidų ateityje (HM Government, 2008). Visa ši sukaupta informacija ir atliktos simuliacijos veda prie dar tikslesnio statinio skaitmeninio dvynio.

Trečiojo statinio gyvavimo ciklo etapo metu, t. y. statybos darbų metu, realizuojamas suprojektuotas statinys. Dažniausiai statybų eiga stebima ir kontroliuojama tiesioginiu / kontaktiniu būdu. Toks rankinis darbas užima ne tik daug laiko, bet ir išsiskiria didele klaidų atsiradimo tikimybe (Costin et al., 2012; Zhao et al., 2019). Statinio statybų etapu taikomas skaitmeninio dvynio modelis leidžia efektyviau valdyti šį etapą, nes viename modelyje yra sukaupta apjungta informacija apie objektą, kuri nurodo ir siekiamą rezultatą.

Naudojant statinį atsiskleidžia pagrindinė skaitmeninio dvynio siekiamybė – realios užstatytos aplinkos ir skaitmeninės jos išraiškos tarpusavio ryšys. Norint įgalinti skaitmeninio ir jo fizinio prototipo duomenų keitimąsi, reikia pasitelkti sensorių, daviklių, jutiklių bei IoT sprendimus.

4. Užstatytos aplinkos skaitmeninio dvynio sukūrimo metodologija ir technologijos

Norint sukurti ir įveiksminti užstatytos aplinkos skaitmeninį dvynį, reikia laikytis šių pagrindinių veiklos etapų: 1) pakartoti tikrąjį fizinį objektą ir/arba jį supančią aplinką, tiksliai ir patikimai sukuriant jo virtualųjį prototipą – skaitmeninį dvynį; 2) sukurti vienintelį patikimos informacijos atskaitos tašką, surinkti duomenis ir užfiksuoti aplinką, visą turto ir jame esančių žmonių istoriją skaitmeniniame dvynyje, palaikyti duomenis visą gyvavimo ciklą; 3) nuolat tikrinti turto būseną ir analizuoti jame esančių žmonių būklę, vizualizuojant jų duomenis per skaitmeninį dvynį, atlikti procesų ir būklės analizę, generuoti išvalgas, siekiant numatyti ir optimizuoti turto našumą; 4) pritaikyti prie aplinkos pokyčių, nuolat pildyti, atnaujinti ir plėsti informaciją, užtikrinant pokyčių valdymą; 5) veikti bandymų stendo principu galimiems fiziniams procesų ir veiklos pokyčiams prognozuoti bei suvaldyti; 6) nustatyti anksčiau nepastebėtus įvykius ar nepaaiškinamus dėsnin-gumus, reikšmes, anomalijas ir neatitikimus, norint užtikrinti saugią ir tvarią turto, jį supančios aplinkos eksploataciją, aukštą personalizuotą jos erdvių kokybę.



2 paveikslas. Skaitmeninio dvynio užpildymas informacija ir jo valdymas (šaltinis: adaptuota iš Centre for Digital Built Britain, 2022): P&ID – vamzdynų ir prietaisų schema, EI&C – elektra, prietaisai ir valdikliai, OEM – originalios įrangos gamintojas, AR – papildytoji realybė, VR – virtualioji realybė, XR – išplėstinė realybė, AI – dirbtinis intelektas, ML – mašininis mokymas
Figure 2. Fill in the digital twin with information and its management (source: adapted from Center for Digital Built Britain, 2022): P&ID – Piping and Instrumentation Diagram, EI&C – Electrical, Instrumentation and Controls, OEM – Original Equipment Manufacturer, AR – Augmented Reality, VR – Virtual Reality, XR – Extended Reality, AI – Artificial Intelligence, ML – Machine Learning

4.1. Skaitmeninio dvynio sukūrimas pagal esamus duomenis

Statinių informacinis modeliavimas (BIM)

Idealiu atveju skaitmeninis dvynys turi būti pradedamas kurti nuo idėjos, koncepcijos projektuojant būsimą infrastruktūros objektą BIM principais, projektavimo etape keliant jo detalumo lygį iki gamybai bei surinkimui tinkamo informacijos lygio, o toliau – statybų metu ir joms pasibaigus – fiksuojant būseną „kaip pastatyta“ (angl. *As Built*).

Lazerinis skenavimas

Lazerinio skenavimo technologijos santykiškai nėra naujos. Lazerinio skenavimo trūkumas – sunkiai interpretuojami gauti duomenys. Tokių matavimų rezultatai – taškų debesys, kurie gali sudaryti vizualiai atpažįstamą objekto vaizdą, bet nesuformuoti galutinio paviršiaus, todėl lazerinio skenavimo duomenis reikia papildomai interpretuoti, kurti išvestinius duomenis – vektorinę informaciją (rankomis įbrėžti taškus jungiančias linijas, paviršius, tūrius).

Kita vertus, didžiausias lazerinio skenavimo privalumas yra itin aukštas tikslumas – lazerinis matavimo prietaisas atkuria objektų taškus erdvėje milimetrų ir net jų dalių tikslumu. Tai itin svarbu atkuriant faktinę „kaip pastatyta“ objekto būseną, ypač kai didelis objekto pozicijos tikslumas yra labai svarbus gamybos požiūriu (pvz., slėginiai pramoniniai vamzdynai ir jų įranga – prirėkūs modernizuoti ar plėsti gamybą, nauji vamzdynai turi būti suprojektuoti ir sumontuoti vietoje milimetrų tikslumu).

Automatizuota fotogrametrija

Automatizuota fotogrametrija – viena sparčiausių ir pigiausių skaitmeninio realybės konteksto atkūrimo technologijų, naudojant tinkamu būdu surinktus fonuottraukų masyvus. 3D erdvė fotogrametrijoje atkurama iš dalies sutampančiuose vaizduose aptinkant identiškus taškus iš skirtingų rakursų (stereo principas), praktiškai be žmogaus įsikišimo.

Vienas didžiausių fotogrametrijos privalumų – galimybė taikyti dirbtinio intelekto (angl. *Artificial Intelligence*, AI) algoritmus automatizuotu būdu atpažįstant ir klasifikuojant nejudančius realybės elementus (statinio dalis, pvz., langus, duris; įrangą, pvz., antenas, vamzdynų sklenkes; infrastruktūros objektus, pvz., stulpus, ženklus ir kt.; gedimus ir pažeidimus, pvz., koroziją, betono ar asfalto įtrūkius ir pan.). Dirbtinio intelekto algoritmai šiandien yra itin išstobulinti vaizdams atpažinti, ką sunku pritaikyti automatiniam kito tipo duomenų interpretavimui.

Skaitmeninio dvynio ir jo fizinio prototipo ryšio užtikrinimas

Skaitmeninis dvynys įgauna gyvybę, kai fizinis dvynys pradeda teikti nuolatinius duomenis apie savo būseną, elgseną. Taip galima pradėti kurti „kas, jeigu“ scenarijus, planuoti numatomojo aptarnavimo (angl. *Predictive Maintenance*) užduotis, kad nebūtų reaguojama į įvykius gedimus, o numatyti galimus trikdžius prieš atsirandant gedimams, remiantis daviklių teikiamais duomenimis ir jų analize.

IoT sprendimai yra aukštesnis skaitmeninio dvynio stebėsenos ir kontrolės lygis, palyginti su sensorių, daviklių, jutiklių naudojimu. IoT priemonės suteikia ir atgalinį ryšį. Pavyzdžiui, matuojama patalpų temperatūra, apšvietimo, oro taršos lygis yra ne tik daviklių parametrai, jie realiuoju arba artimu jam laiku patenka į integruotas debesijos sistemas, kur veikiančys algoritmai ir žmogaus nurodyti kriterijai suformuoja automatinis nurodymus prietaisams keisti sąlygas, pavyzdžiui, pritaikyti temperatūrą, drėgmės lygį, apšvietimo sąlygas ir t. t.

4.2. Skaitmeninio dvynio duomenų apdorojimas

Diegiant ir įsisavinant skaitmeninio dvynio technologijas bei įrangą, itin svarbu užtikrinti, kad kaupiami duomenys būtų realiai naudojami. Kompanijos IBM vertinimu, apie 90 % duomenų, kaupiamų iš įvairių daviklių ar gaunamų analoginių signalų konversijos į skaitmeninius metu, lieka niekada nepanaudoti. Tokie duomenys vadinami tamsiaisiais duomenimis (angl. *Dark Data*). Tam yra kelios priežastys: nėra sprendimų, kurie galėtų perskaityti saugomus duomenis; turimi analizės sprendimai gali priimti apdorojimui tik struktūrizuotus duomenis; duomenys nėra visaverčiai, nesuteikia norimos informacijos; per daug duomenų, nepakanka galios jų apdoroti (Rao, 2018).

Skaitmeninio dvynio koncepcijai įgyvendinti reikia galingų duomenų apdorojimo technologijų ir skaičiavimo galios, kad šį prieinamų didžiųjų duomenų srautą būtų galima paversti reikiamais rezultatais. Būtina atnaujinti

ne tik kompiuterių įrangą, išplėsti duomenų saugojimo vietas apimtis, bet ir siekti pritaikyti naujausią duomenų apdorojimo programinę įrangą, turėti įvairiapusių funkcinių programinių parką, vystyti moksliskai naujus duomenų apdorojimo ir analizės algoritmus, pvz., mašinų mokymasis (angl. *Machine Learning*, ML) ir dirbtinis intelektas (angl. *Artificial Intellect*, AI) praplečia duomenų analizės galimybes, leidžia atrasti ir atpažinti skaitmeninių dvynių modeliuose procesų anomalijas, rodančias į nematomus gedimus ir galimas jų priežastis. Siekiant spręsti įvairias problemas, susijusias su erdvine tiesine ir netiesine, statine ir dinamine medžiagų bei konstrukcijų elgsenos analize stacionariuose ir pereinamuose procesuose, atsižvelgiant į laiko ir aplinkos poveikio veiksnius, galima pasitelkti daugiafunkčių baigtinių elementų analizės (angl. *Finite Element Method Analysis*, FEM/FEA) sistemas, skirtas spręsti daugeliui kietojo deformuojamojo kūno mechanikos, gruntų mechanikos, skysčių mechanikos uždavinių taikomojoje statybinių konstrukcijų ir inžinerinių statinių bei geotechnikos srityje. Projektinį būsimą statinio, įrenginio ar infrastruktūros objekto modelį vertinti padeda virtualiosios realybės (angl. *Virtual Reality*, VR) akiniai ir šalmi, dažnai kartu aprūpinti ir garso atkūrimo įranga (ausinėmis) bei rankose laikomais manipulatoriais, kurie leidžia virtualiojoje realybėje objektą paliesti, apklausti, virtualiai pakeisti jo būseną (pvz., įjungti virtualųjį įrenginį, atverti duris ir pan.). Papildytosios realybės (angl. *Augmented Reality*, AR) atveria naujas valdymo efektyvumo erdves – statybvietėje, lyginant jau realiai pastatytas objekto dalis su projektiniu modeliu, galima įvertinti progresą, nustatyti nuokrypius, prognozuoti tolesnius etapus tiriant, ar esama realybė nesudarys kliūčių statybos procesams. AR priemonės leidžia tiksliau ir operatyviau atlikti priežiūros darbus matant sienose ar po apdaila konstrukcijų elementus, vamzdynus, kabelius, įrenginius.

5. Užstatytos aplinkos skaitmeninio dvynio naudojimo galimybės ir nauda

Skaitmeniniai dvyniai, kaip vertingas sukurtos aplinkos skaitmeninis turtas, gali padėti įvairiais atvejais, įskaitant patalpų valdymo ir eksploatavimo, turto būklės stebėjimo, tvaraus pastato vystymo ir kt. Skaitmeninio dvynio naudojimo galimybės ir nauda ypač atsiskleidžia priimančiam sprendimus, nes yra sukaupta patikimos, naudingos ir lengvai pasiekiamos informacijos (Brilakis et al., 2020). Šią naudą, bet iš kitos perspektyvos, išskiria Deng ir kt. (2020), nes skaitmeniniai dvyniai atlieka realiojo laiko informacijos integravimo su atitinkamais automatizuotais procesais vaidmenį, o tai padeda sprendimų priėmimo sistemai valdyti užstatytą aplinką.

Nagrinėjant skaitmeninio dvynio naudojimo galimybes, kaip pavyzdžius galima pateikti kelis iš jų:

1. Statybų proceso monitoringas: BIM ir IoT vystymas statybvietėse gali užtikrinti efektyvų statybų procesą ir jo valdymą (Deng et al., 2020). Pavyzdžiui, Han ir Ye (2018) pasiūlė koncepciją, skirtą integruoti IoT ir debesimis pagrįstą BIM statybų procesą, kad būtų galima

- efektyviau valdyti surenkamųjų gelžbetoninių elementų montavimą. Šios sistemos pritaikymas grįstas tuo, kad bet kuriuo metu galima atsekti informaciją apie surenkamųjų elementų padėtį. Taip pat sisteminis BIM metodologijos ir įvairių jutiklių bei daviklių integravimas į statybos procesą gali paspartinti darnios statybos plėtotę (Liu & Deng, 2017).
2. Energijos efektyvumo valdymas: Lee ir kt. (2016) atliko tyrimą, pasitelkę „Autodesk Revit“ programą, interneto naršyklės ir pastatų automatizavimo sistemas. Jis sukūrė pastato energijos suvartojimo vizualizaciją realiuoju laiku, kuri padėjo sutaupyti apie 17 % pastato suvartojamos energijos. Pasiiekti šį skaičių pavyko todėl, kad realiojo laiko informaciją buvo paprasčiau surinkti, o tai pagerino apšvietimo ir oro kondicionavimo sistemų valdymą.
 3. Vidaus aplinkos stebėjimas: naudodami jutiklių ir daviklių sistemas galima sumažinti pavojų žmonių sveikatai ir saugai, Riaz ir kt. (2015) sukūrė prototipą, kuris renka informaciją apie realiojo laiko temperatūrą ir deguonies kiekį, esantį patalpose, kaip pagrindą įvairių patalpų valdymo sprendimams priimti, evakuacijai planuoti. Pasitelkiant įvairius jutiklius ir skaitmeninį pastato modelį realiuoju laiku, taip pat galima stebėti dujų nuotėkį, vandentiekio avarijas, numatyti grėsianti pavojų, pavyzdžiui, laikančiosios konstrukcijos avarinę būklę, kuri gali sukelti namo griūtį. Stebint vidaus aplinką realiuoju laiku, galima sumažinti ne tik pavojų žmonių sveikatai ir saugai, bet ir pagerinti jutimines žmogaus buvimo sąlygas, pvz., realiuoju laiku stebėti ir valdyti patalpų temperatūrą, drėgmę, kurios veikia žmonių savijautą.
 4. Erdvės valdymas: pasitelkę BLE (Bluetooth Low Energy) signalus, Ferreira ir kt. (2018), Xiaodong ir kt. (2018) sukūrė sistemą, kuri gali suteikti informaciją apie asmenų, esančių pastate, judėjimą ir buvimo vietą. Išmaniuoju telefonu jie būtų nukreipti į paskirties vietą, taip sumažinant laiką, reikalingą tam tikram taškui pasiekti. Tai ypač svarbu ekstremalioje situacijoje ir kilus poreikiui evakuotis iš pastato.
- Taigi, skaitmeninių dvynių nauda grindžiama statinio (turto) informacijos modeliu ir su juo susijusia duomenų bei informacijos apie visus sistemą sudarančius elementus saugykla, kurioje nurodoma, kaip sistema organizuota, kaip ji veikia realaus pasaulio kontekste. Paversdami ne-struktūruotą informaciją intelektiniu skaitmeniniu turto modeliu, realaus objekto operatoriai įgalinami virtualizuoti valdomą objektą, vizualizuoti su jo valdymu susijusias operacijas (naudojant virtualiąją, papildytąją ir įtraukiančią realybę), per objekte įdiegtą ir jo aplinkoje esančių jutiklių, daviklių ir sensorių sistemą stebėti fizinio turto būklę, palaikyti kontaktą su jo skaitmeniniu dvyniu, atlikti užklausas, gauti atsakymus apie sistemų būseną, palyginti ją su modeliuojamais elgsenos scenarijais ir jų kritiniais parametrais. Taip prognozuojami pavojai, valdomos įvairaus sudėtingumo inžinerinės sistemos, struktūros ir įrenginiai, užtikrinamas saugus ir efektyvus jų veikimas per visą gyvavimo ciklą.

Išvados

Skaitmeninis dvynys yra palyginti naujas reiškinys, nepaisant to, išvelgiama didelė pridėtinė vertė vystant ir tobulinant realią užstatytą aplinką. Norint atpažinti skaitmeninį dvynį, reikia išvelgti tris pagrindinius šio reiškinio objektus: virtualusis fizinis objektas, realus fizinis objektas ir skaitmeniniai informacijos ryšiai tarp jų. Tam, kad skaitmeninio dvynio reiškinys veiktų efektyviausiai, informacija apie realų fizinį objektą turi būti pradedama kaupti skaitmeninėje erdvėje nuo pat objekto gyvavimo ciklo pradžios. Jei galimybės kaupti ir rinkti duomenis apie objektą nuo jo gyvavimo ciklo pradžios nėra, informacijai rinkti apie jau esamą objektą galima pasitelkti kitas technologijas, pvz., lazerinį skenavimą ar fotogrametriją.

Esant tiek virtualiajam, tiek realiam objektui ir norint sukurti galutinai veikiančią skaitmeninį dvynį, reikia užtikrinti informacinių ryšių srautą tarp virtualiojo ir realaus objektų. Šiam tikslui pasiekti pasitelkiami, pvz., IoT sprendimai. Taip nuolat stebima oro temperatūra, drėgmė ir kiti aktualūs rodikliai. Tačiau skaitmeninio dvynio naudą galima išvelgti ne tik jau esančio objekto ir jo skaitmeninio modelio sąveikos procese, bet ir valdant statybų procesą. Tai leistų išvengti galimų klaidų ir siekti darnios statybos rodiklių.

Literatūra

- Aengenvoort, K., & Krämer, M. (2018). BIM in the operation of buildings. In A. Borrmann, M. König, C. Koch, & J. Beetz (Eds.), *Building information modeling: Technology foundations and industry practice* (pp. 477–491). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_29
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., Harradence, F., Keane, E., Kemp, A., Luck, A., Pawsey, N., Saville, S., Schooling, J., Sharp, M., Smith, T., Tennisson, J., Whyte, J., Wilson, A., & Makri, C. (2018). *Gemini principles*. Centre for Digital Built Britain. <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). *Building information modeling: Why? What? How?* In A. Borrmann, M. König, C. Koch, & J. Beetz (Eds.), *Building information modeling: Technology foundations and industry practice* (pp. 1–24). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_1
- Brilakis, I., Pan, Y., Borrmann, A., Mayer, H. G., Rhein, F., Vos, C., Pettinato, E., & Wagner, S. (2020). *Built environment digital twinning*. https://publications.cms.bgu.tum.de/reports/2020_Brilakis_BuiltEnvDT.pdf
- Burke, R. (2010). *Project management: Planning and control techniques* (3rd ed.). John Wiley & Sons LTD. <https://books.mec.biz/tmp/books/KHSKE2BOJHLTNSJMQXTQ.pdf>
- Centre for Digital Built Britain. (2022). *Digital twin journeys*. <https://www.cdcb.cam.ac.uk/research/digital-twin-journeys>
- Costin, A., Pradhananga, N., & Teizer, J. (2012). Leveraging passive RFID technology for construction resource field mobility and status monitoring in a high-rise renovation project. *Automation in Construction*, 24, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.015>
- Deng, M., Menassa, C. C., & Kamat, V. R. (2020). From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of

- intelligent building representations in the AEC-FM industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 58–83. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005>
- El Saddik, A. (2018). Digital twins: The convergence of multimedia technologies. *IEEE MultiMedia*, 25(2), 87–92. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167>
- Ferreira, J., Resende, R., & Martinho, S. (2018). Beacons and BIM models for indoor guidance and location. *Sensors*, 18(12), 4374. <https://doi.org/10.3390/s18124374>
- Gallan, A. S., McColl-Kennedy, J. R., Barakshina, T., Figueiredo, B., Jefferies, J. G., Gollnhofer, J., Hibbert, S., Luca, N., Roy, S., Spanjol, J., & Winklhofer, H. (2019). Transforming community well-being through patients' lived experiences. *Journal of Business Research*, 100, 376–391. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.12.029>
- Gerber, D., Nguyen, B., & Gaetani, I. (2019). *Digital twin: Towards a meaningful framework*. Arup Research. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/digital-twin-towards-a-meaningful-framework>
- Han, C., & Ye, H. (2018). A novel IoT-Cloud-BIM based intelligent information management system in building industrialization. In *International Conference on Construction and Real Estate Management* (pp. 72–77), Charleston, South Carolina. <https://doi.org/10.1061/9780784481721.008>
- HM Government. (2008). *Strategy for sustainable construction*. Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform, London. <https://www.sustainabilityexchange.ac.uk/berr-strategy-for-sustainable-construction>
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmstrom, J. (2019). Digital twin: Vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE Access*, 7, 147406–147419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lee, D., Cha, G., & Park, S. (2016). A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 807–814. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0099-4>
- Liu, Z., & Deng, Z. (2017). A systematic method of integrating BIM and sensor technology for sustainable construction design. *Journal of Physics: Conference Series*, 910, 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/910/1/012071>
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Rao, V. (2018). *Extracting dark data*. <https://developer.ibm.com/articles/ba-data-becomes-knowledge-3/>
- Rees, W. E. (1999). The built environment and the ecosphere: A global perspective. *Building Research & Information*, 27(4–5), 206–220. <https://doi.org/10.1080/096132199369336>
- Riaz, Z., Arslan, M., & Peña-Mora, F. (2015). Challenges in data management when monitoring confined spaces using BIM and wireless sensor technology. In *2015 International Workshop on Computing in Civil Engineering* (pp. 123–130), Austin, Texas. <https://doi.org/10.1061/9780784479247.016>
- Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 1, e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Ubartė, I., Čerkauskas, J., Turūta, A., ir Naumcik, A. (2016). Models and systems analysis of built environment life cycle. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*, 7(5), 520–527. <https://doi.org/10.3846/mla.2015.849>
- World Economic Forum. (2016). *Shaping the future of construction: A breakthrough in mindset and technology*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf
- Xiaodong, G., Jiwei, H., Siyu, L., Jianhua, L., & Mingyi, D. (2018). Indoor localization method of intelligent mobile terminal based on BIM. In *2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS)* (pp. 1–9), Wuhan, China. <https://doi.org/10.1109/UPINLBS.2018.8559731>
- Zhao, J., Seppänen, O., Peltokorpi, A., Badihi, B., & Olivieri, H. (2019). Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction. *Automation in Construction*, 104, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.003>

THE CONCEPT OF THE DIGITAL TWIN OF THE BUILT ENVIRONMENT

E. Grigorjeva

Abstract

The built environment is an area where there are buildings and other objects that meet people's needs. One of the ways to differentiate people's needs and satisfy them in real time is to use a digital twin (DT). The digitalization of the construction process uses building information modeling (BIM) methodology. When BIM is applied from the very beginning of the idea of implementing an object of the built environment, information about the object begins to be accumulated from the very beginning of the object's life cycle. Accumulating information about the object is particularly important to extract the best version of the DT model. It is also important to understand that it is not enough to have a real object and digital information about it. The digital twin will work if information links between the real and virtual environment are provided.

Keywords: built environment, digital twin, building information modeling, DT, BIM.