

# Modernien mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntäminen tuotantolinjojen digitaalisissa kaksosissa

TURUN YLIOPISTO  
Tietotekniikan laitos  
TkK-tutkielma  
Tietotekniikka  
Joulukuu 2025  
Eetu Salminen

TURUN YLIOPISTO  
Tietotekniikan laitos

EETU SALMINEN: Modernien mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntäminen tuotantolinjojen digitaalisissa kaksosissa

TkK-tutkielma, 25 s.  
Tietotekniikka  
Joulukuu 2025

---

Tässä tutkielmassa perehdytään moderneihin mobiiliverkkoteknologioihin sekä digitaaliseen kaksoseen. Aihealueiden tutkimustieto on pidetty mahdollisimman ajankohtaisena ratkaisujen terminologiasta riippumatta. Modernit mobiiliverkkoteknologiat käsittävät 5G- ja 6G-tekniikat. Digitaalinen kaksonen on jostakin fyysisestä järjestelmästä tai tuotteesta tehty tarkka digitaalinen simulaatio. Se eroaa perinteisestä simulaatiosta siinä, että sillä on aina olemassa oleva fyysinen vastinkappale. Data liikkuu molempiin suuntiin kaksosten välillä. Moderneilla mobiiliverkkoteknologioilla on merkittävä rooli digitaalisen kaksosen toiminnassa. Digitaalisen kaksosen haasteita tuotantoympäristöissä ovat niiden suorituskyky ja luotettavuus, joten tämän vuoksi tutkittiin, onko digitaalisten kaksosten optimointi pelkästään mobiiliverkkoteknologioiden avulla mahdollista. Tutkielmassa havaittiin, että optimaalisissa olosuhteissa mobiiliverkot tarjoavat ratkaisut suorituskyvyn parantamiseen, mutta todellinen pullonkaula ei ole verkkotekniikka, vaan integraatio. Suurin este on fyysisen kaksosen eri-ikäisten laitteiden ja protokollien yhteensopimattomuus, jonka tunnistamista vaikeuttavat korkeat kustannukset.

Asiasanat: 5G, 6G, digitaalinen kaksonen, mobiiliverkkotekniikat, tuotanto, palveluluokat, säteenmuodostus, verkon viipalointi

# Sisällys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modernit mobiiliverkkoteknologiat</b>	<b>4</b>
2.1	5G-teknologia . . . . .	4
2.2	6G-teknologia . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Digitaalinen kaksonen tuotantoympäristössä</b>	<b>9</b>
3.1	Digitaalisen kaksonen peruseriaatteet . . . . .	10
3.2	Mahdollisuudet digitaalisessa kaksoessa . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Digitaalisen kaksonen optimointi mobiiliverkkoteknologioilla</b>	<b>15</b>
4.1	Luotettava ja nopea ohjaus . . . . .	15
4.2	Suuret laitemäärät . . . . .	18
4.3	Kapasiteetti . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>24</b>
	<b>Lähdeluettelo</b>	<b>26</b>

# Kuvat

1.1	Tiedonhaun vaiheet . . . . .	3
2.1	5G-palveluluokat sekä 6G-käyttöskenaariot. . . . .	7
3.1	Digitaalisen kaksosen suhteellisen kiinnostuksen kehitys Googlen ha- kukoneessa alkaen vuodesta 2010. . . . .	10
3.2	Eri teknologioiden rooli kaksosten tiedonsiirrossa. . . . .	12
4.1	Teollisuusautomaatiojärjestelmän kehitys kohti pilvi- ja reunalaskentaa.	17
4.2	EPRS:n esittämät suorituskykytavoitteet 6G-teknologialle . . . . .	19

# 1 Johdanto

Modernit mobiiliverkkoteknologiat ovat nykyään suuressa roolissa ihmisten arjessa internetinkäytön myötä. Yksittäisten ihmisten lisäksi mobiiliverkkoteknologiat ovat kasvavassa roolissa myös teollisuuden eri osa-alueilla [1]. Digitaalinen kaksonen (engl. *digital twin*, DT) on Teollisuus 4.0:n myötä yleistynyt uusi teknologia. Teollisuus 4.0 tarkoittaa teollisuuden neljättä vallankumousta, jonka keskeisenä ajatuksena on fyysisten sekä digitaalisten järjestelmien vuorovaikutus älykkäissä tehdasympäristöissä. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa fyysisten järjestelmien käytön optimointia luomalla niistä digitaalisen vastineen. Digitaalisen kaksosen toimintaan liittyy useita teknologioita, joista merkittävässä roolissa ovat nimenomaan modernit mobiiliverkkoteknologiat [2].

Tämä kandidaatintutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Digitaalisten kaksosten tutkimus on rajattu koskemaan eritoten tuotantolinjastoja ja teollisuutta. Tutkielman pääasiallinen tavoite on selvittää, millä tavoilla digitaalista kaksosta voidaan optimoida käyttäen hyväksi moderneja mobiiliverkkoteknologioita. Lisäksi tarkoituksena on selvittää, mitkä osa-alueet vaikuttavat digitaalisen kaksosen kehitykseen ja mitkä teknologiat toimivat pullonkauloina. Näiden tavoitteiden pohjalta tutkimuskysymyksiksi (TK) ovat muodostuneet seuraavat:

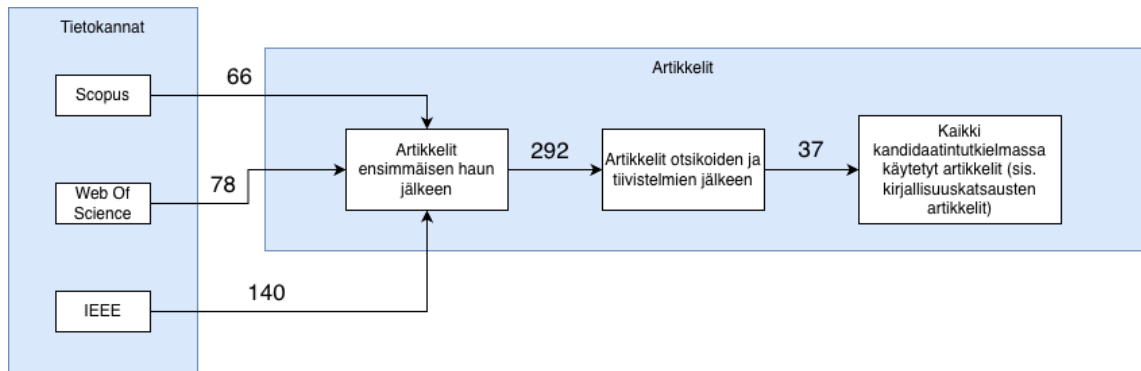
**TK1:** Mitkä tekijät rajoittavat mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntämistä digitaalisten kaksosten luotettavuuden ja suorituskyvyn parantamisessa tuotantolinjoilla?

**TK2:** Miten modernit mobiiliverkkoteknologiat voivat tehostaa digitaalisen kaksosen suorituskykyä ja luotettavuutta tuotantolinjoilla?

Tutkielman taustamateriaaliksi analysoitiin kirjallisuutta sekä artikkeleiden otsikoita ja tiivistelmiä. Tavoitteena oli muodostaa ajantasainen kokonaiskuva digitaalisen kaksosen nykytilasta ja tulevaisuuden käyttökohteista.

Artikkelit, joihin tutkielma perustuu, haettiin kolmesta eri lähteestä: **IEEE**, **Web of Science** sekä **Scopus**-tietokannoista. Osa artikkeleista on myös otettu kirjallisuuskatsauksista. Aihepiirin terminologia ei ole varsinkaan 6G:n osalta vielä täysin vakiintunutta. Kaikki käytetyt artikkelit ovat englanninkielisiä.

Kuvassa 1.1 on visualisoitu prosessi, jota käytettiin tiedonhakuun. Hakutuloksista löytyi yhteensä 292 artikkelia joista 148 oli IEEE:stä, 78 Web of Sciencestä sekä loput 66 Scopusesta. Hakulauseena on käytetty jokaisessa tietokannassa seuraavaa: (*"5G"OR "6G"OR "fifth generation wireless"OR "sixth generation wireless"*) AND (*"Digital twin"OR "DT"*) AND (*"production line"OR "manufacturing"OR "industrial automation"*).



Kuva 1.1: Tiedonhaun vaiheet

Vaikka mobiiliverkkoteknologiat sekä digitaalinen kaksosen ovat tähän päivään mennessä hyvin tutkittuja aiheita, niiden yhteisvaikutus sekä pullonkaulat vaativat vielä systemaattista kartoitusta [3].

Työn luku 2 on taustatietoa mobiiliverkkoteknologioista, ja siinä keskitytään erityisesti niihin mobiiliverkkoteknologioiden ominaisuuksiin, jotka ovat suuressa roolissa työn aiheen kannalta. Luku 3 esittelee digitaalisen kaksosen. Luvussa 4 tutkitaan mobiiliverkkoteknologioiden sekä digitaalisen kaksosen yhteispeiliä, vaikutuksia ja mahdollisuuksia. Luvut 5 ja 6 sisältävät pohdinnan sekä yhteenvedon.

## 2 Modernit mobiiliverkkoteknologiat

Modernit mobiiliverkkoteknologiat muodostavat perustan teollisuuden digitalisatiolle sekä älykkäiden tuotantoympäristöjen kehitykselle. Viidennen sukupolven (5G) radioverkkojen käyttöönotto on ollut käynnissä 2020-luvun alusta lähtien. 5G:n tarkoituksena on ollut lisätä yhteyksien nopeutta, kapasiteettia sekä luotettavuutta, mutta sen ominaisuudet eivät yksinään riitä vastaamaan tulevaisuuden sovellusten kasvaviin vaatimuksiin 2030-luvulla. Näiden rajoitteiden myötä kuudennen sukupolven (6G) mobiiliverkkojen kehitystyö keskittyy entistä laajempaan taajuusalueeseen, energiatehokkuuteen ja tietoturvasoon [4].

### 2.1 5G-teknologia

5G on tähän päivään mennessä jo hyvin laajalle levinnyt teknologia, jota käytetään teollisten ympäristöjen lisäksi monissa yksittäisen ihmisen arkipäivää koskevissa ratkaisuissa. Teollisuudessa 5G on kuitenkin mahdollistanut neljänteen sukupolveen (4G) verrattuna suuria kehitysaskelia, joiden myötä Teollisuus 4.0:sta tutut teknologiat, kuten IoT (Internet of Things), digitaalinen kaksonen sekä tekoäly (engl. *artificial intelligence*, AI) ovat kehittyneet [1]. 5G mahdollistaa reaaliaikaisuuden, sillä se tukee suuria laitemääriä sekä nopeaa datankäsittelyä. 5G:n tehokkuus perustuu suureen kapasiteettiin, nopeaan datansiirtoon sekä pieneen latenssiin [5], minkä vuoksi sen käyttö teollisissa ympäristöissä on jatkuvasti lisääntymässä. Tämä havaittiin myös 5G-CONNI-projektissa, jossa 5G:n ominaisuuksia testattiin kolmella

eri käyttöesimerkillä (engl. *use case*). Projektin tuloksista käy ilmi, että 5G pystyy teollisuusympäristössä tarjoamaan riittävän suorituskyvyn reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon, mikä mahdollistaa esimerkiksi IoT-laitteiden ja anturiverkkojen sekä sitä kautta digitaalisten kaksosten hyödyntämisen tuotantoprosesseissa [6]. Vaikka 5G-CONNI on suosittu tutkimus, sen testiympäristö on teoreettinen eikä sillä ole kaupallista skaalautuvuutta. Rajoittavina tekijöinä 5G:n kehityksessä ovat esimerkiksi riippuvuus korkeista taajuuksista, joka lyhentää signaalin kantamaa, sekä tietoturvaongelmat, jotka syntyvät laitteiden suuresta määrästä [7].

**5G-palveluluokat.** 5G on tuonut mukanaan myös palveluluokat (engl. *service type*). Ne ovat ratkaisevassa asemassa Teollisuus 4.0:n läpimurrossa ja tuottavat merkittäviä hyötyjä niiden käyttäjille. Palveluluokkien tarkoituksena on muodostaa verkon teknisistä ominaisuuksista erityyppisiä viestintäpalveluita, joiden avulla verkon käyttötarkoitusta voidaan optimoida ja kohdentaa [6]. Tavalliselle käyttäjälle eniten näkyvissä on eMBB (Enhanced Mobile Broadband), joka mahdollistaa lisätyn sekä virtuaalisen todellisuuden (AR/VR) sekä esimerkiksi UltraHD-laadun videoiden toiston. Valtavissa kokonaisuuksissa merkittävässä asemassa on mMTC (Massive Machine Type Communication), jonka ideana on tukea miljoonia laitteita neliökilometriä kohden. Koska tämä tutkielma käsittelee digitaalisen kaksosen optimointia nimenomaan laadun ja luotettavuuden näkökulmasta, mMTC:n lisäksi toinen tärkeä yksittäinen palveluluokka on URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication). URLLC:n idea on minimoida viivettä, joten se on käytössä esimerkiksi laitteiden etäohjauksessa. [8]

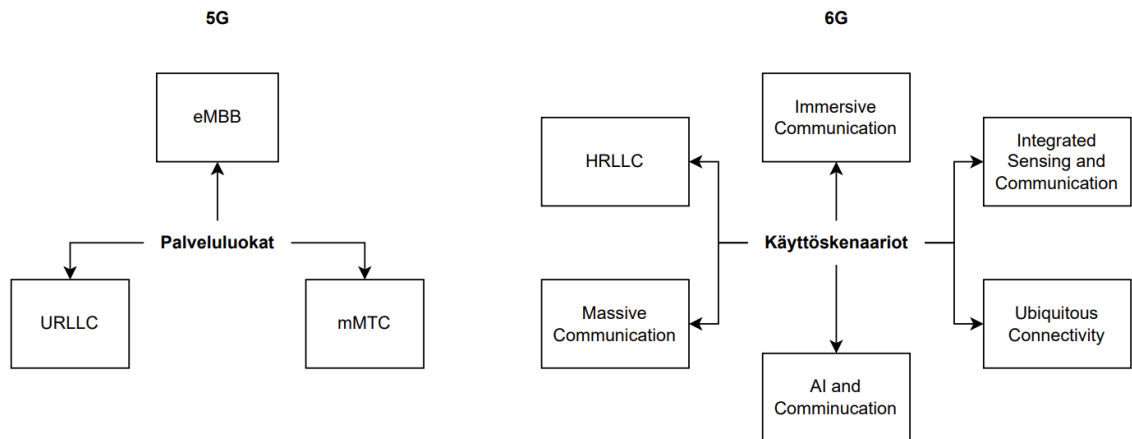
Palveluluokkien tukena 5G:llä on myös erillisiä ominaisuuksia, jotka ovat merkittävässä asemassa luotettavuuden ja kapasiteetin kannalta. Mainitsemisen arvoinen näistä on 5G:n säteenmuodostus (engl. *beamforming*). Sen tarkoituksena on suunnata langattomia radiosignaaleja tarkasti tietylle alueelle ja vähentää häiriöitä ja signaalin heikkenemistä [8]. Toinen tärkeä ominaisuus on verkon viipalointi (engl.

*network slicing*), joka on erityisesti tuotantoympäristössä käytössä. Verkon viipaloinnin avulla verkkoa voidaan jakaa viipaleisiin, joilla on jokin tietty ominaisuus. Esimerkiksi viipaleita voidaan kohdentaa eri käyttötarkoituksiin, kuten eMBB-viipale datansiirrolle ja URLLC-viipale laitteen ohjaukselle [9].

## 2.2 6G-teknologia

Vaikka 5G:n täyttä potentiaalia tai ominaisuuksia ei ole pystytty varsinkaan URLLC:n tai mMTC:n osalta täysin hyödyntämään [10], on 6G:n kehittämistä tehty jo pitkään. Kehitys on tehostunut COVID-19-pandemian myötä, jolloin käyttäjät tulivat entistä riippuvaisemmiksi virtuaalisista kokouksista sekä reaaliaikaisesta videoyhteydestä aina terveydenhuollosta koulutukseen saakka [11]. 6G:n oletetaan olevan seuraava merkittävä askel mobiiliverkkoteknologioiden kehitykselle ja tuovan mukanaan uusia ominaisuuksia ja mullistavan mobiiliverkkoteknologioiden käyttötarkoituksia [12].

**6G-palveluluokat.** 6G:n ottaman teknisen harppauksen myötä myös sen tarjoamat palveluluokat muuttuvat. 6G on vasta kehitysvaiheessa ja sen lopullisia standardeja vasta muotoillaan. Tämän vuoksi 6G:n kohdalla puhutaan paljolti käyttöskenaarioista (engl. *use case*) palveluluokkien sijaan. ITU-R (International Telecommunication Union (Radiocommunication sector)), käyttää termiä "*International Mobile Telecommunications (IMT) for 2030 and beyond*" kuvatessaan tätä 6G:n kehitystä. Saman kehityksen puitteissa määritellään yllä mainittuja käyttöskenaarioita sekä niiden vaatimuksia. Alla on kaavio, jossa 5G:n olemassa olevat palveluluokat ja 6G:n suunnitellut käyttöskenaariot ovat havainnollistettu. [13], [14]



Kuva 2.1: 5G-palveluluokat sekä 6G-käyttöskenaariot, joiden pohjalta palveluluokat muodostuvat. HRLLC = Hyper Reliable and Low Latency Communication. Lähde: Mukailtu [13]

Digitaalisten kaksosten kannalta kaikki käyttöskenaariot eivät ole tuotantoympäristössä yhtä relevantteja. Siksi 6G-palveluluokkia käsittelevän luvun lopussa keskitytään niihin skenaarioihin, joilla on merkitystä reaaliaikaisessa päätöksenteossa sekä optimoinnissa. Myöhemmin esiteltävän digitaalisen kaksosen optimoinnin kannalta erityisen merkityksellisiä ovat kaksi luokkaa. Näitä ovat ensinnäkin mMTC (5G-palveluluokka / 6G:n massiivinen koneviestintä) ja toiseksi HRLLC (joka vastaa 5G:n URLLC-palveluluokkaa) [1].

Tuotantoympäristössä käyttöskenaarioista HRLLC:n sekä massiivisen koneviestinnän luotettavuus ja toiminta perustuu sen alla toimiviin alustaverkkoihin (engl. *underlayer networks*). Alustaverkot muodostuvat useista yksityisistä tai julkisista verkoista, joiden päälle rakennetaan esimerkiksi digitaalisen kaksosen hallinta. Alustaverkot on kehitetty viestintäinfrastruktuuriksi. Niiden tehtävänä on täyttää teollisuuden kriittiset vaatimukset, kuten pieni viive, suuri kaistanleveys sekä tietoturva [15].

Näiden kahden 6G-käyttöskenaarion hallintaan sekä käyttöönottoon (engl. *implementation*) liittyy kuitenkin vielä paljon haasteita [16]. Niistä merkittävimpänä ni-

menomaan luotettavuuden ja optimoinnin kannalta on eri aikakausien teknologioiden integrointi, sillä se aiheuttaa viivettä ja katkoksia. Tämä johtuu siitä, että vanhemmat laitteet ja protokollat vaativat muuntamista ja sovittamista toimiakseen sujuvasti nykyaikaisten teknologioiden kanssa. Myös suuret laitemäärät tekevät käyttöönotosta haastavaa, mikä ilmenee käyttöskenaarioiden lisäksi laajasti myös muilla 6G:n käyttöönoton osa-alueilla Teollisuus 4.0:n ja 5.0:n yhteydessä [16], [17].

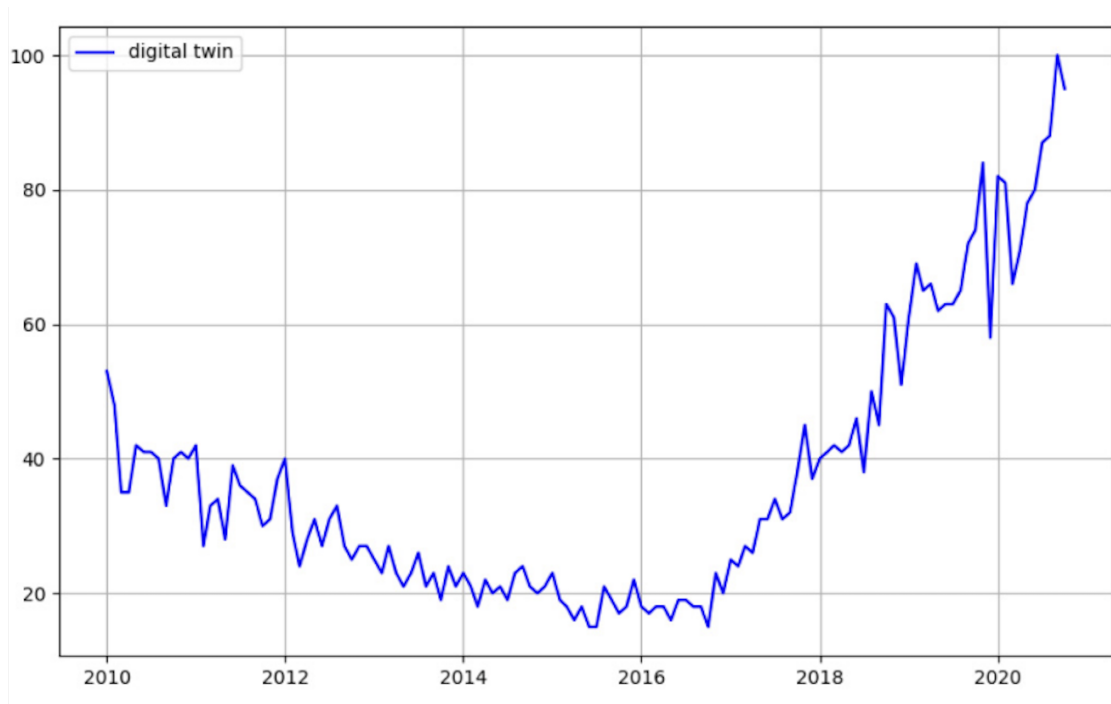
6G teoriassa vastaa suoraan 5G:n tämänhetkisiin haasteisiin. Esimerkiksi Ennaceur ja kumppanit [18] toivat tapaustutkimuksessaan (engl. *case study*) esiin terahertsitaajuudet (engl. *terahertz frequency*, THz) digitaalisessa kaksosessa, mikä implementoituna teollisuuteen ratkaisisi 5G:n kapasiteettiongelmat.

Toinen merkittävä parannus 6G:ssä on siihen integroitu tekoäly. Sitä voidaan hyödyntää monipuolisesti, mutta mekaanisessa tuotannossa siitä olisi hyötyä eritoten verkon viipaloinnissa. Tekoälyn suorittama verkon viipalointi olisi suuntaukseltaan tarkempaa ja kestäisi enemmän häiriöitä. [11]

# 3 Digitaalinen kaksonen tuotantoympäristössä

Digitaalinen kaksonen tarkoittaa fyysisesti olemassa olevan järjestelmän reaaliaikaista, digitaalista mallia. Se jäljittelee vastapuolensa eli fyysisen kaksosensa (engl. *physical twin*) toimintaa, rakennetta ja käyttäytymistä. Käsitteen kehitti professori Michael Grieves vuonna 2003 ja se määriteltiin virallisesti vuonna 2006 National Aeronautics and Space Administrationin (NASA) toimesta. Digitaalista kaksosta on Teollisuus 4.0:n kehityksen myötä alettu hyödyntämään laajasti eri toimialoilla ja mielenkiinto teknologiaa kohtaan on kasvanut myös yritysmaailman ulkopuolella. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan mallintaa fyysisen kaksosen kohdistuvia "mitä jos" -skenaarioita ja se eroaa perinteisestä simulaatiosta siinä, että sillä on aina fyysinen kaksonen jota se reaaliaikaisesti mallintaa. Kuva 3.1 havainnollistaa digitaalisen kaksosen kasvanutta suosiota (engl. *search interest*) Google-hakujen näkökulmasta.

[2]



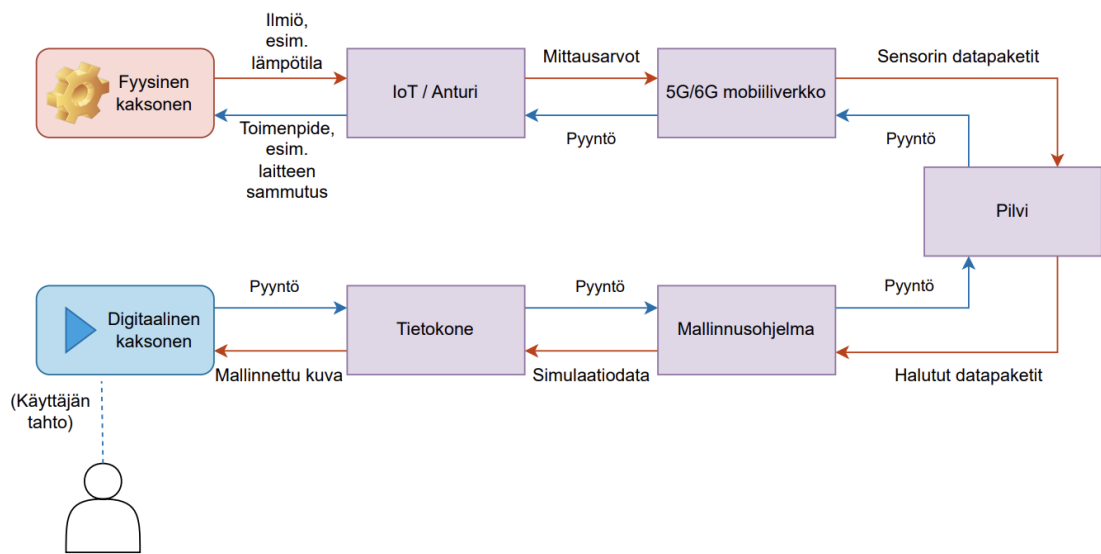
Kuva 3.1: Digitaalisen kaksosen suhteellisen kiinnostuksen kehitys Googlen hakukoneessa alkaen vuodesta 2010. Lähde: Mukailtu [19]

### 3.1 Digitaalisen kaksosen peruseriaatteet

Digitaalisen kaksosen peruseriaatteena on olla reaaliaikainen malli jollekin fyysiselle järjestelmälle. Se toteutetaan käyttäen erilaisia IoT-laitteita, jotka keräävät dataa fyysisestä laitteesta. Reaaliaikaisuuden ansiosta digitaalista kaksosta voidaan käyttää esimerkiksi ennakointiin tai virheiden havaitsemiseen. Se ei ole pelkästään staattinen malli (engl. *static model*), vaan sitä voidaan käyttää testaamaan erilaisia tilanteita ja muutoksia ennen toimenpiteitä fyysiseen kaksoseen [20]. Mitä laajempi malli on, sitä enemmän siitä saadaan hyötyä. Esimerkkinä käyttökohteista voi olla tuotantonopeuden muuntelu pullonkaulojen havaitsemiseksi, kulutusosien kuluminen tai turvallinen havainnointi siitä, miten fyysinen kaksonen reagoi ylikuormituk-

seen [21]. Kaikki nämä mahdollisuudet johtavat tuotannon kokonaisvaltaiseen optimointiin sekä huoltojen ennustamiseen, mikä vähentää seisokkeja ja lisää fyysisen kaksosen käyttöikä. [20]

**Teknologiat digitaalisessa kaksosessa.** Eri teknologioista erityisesti mobiiliverkkoteknologiat ja nimenomaan 5G, ovat merkittävässä roolissa digitaalisen kaksosen toiminnan kannalta, sillä ne mahdollistavat kaiken sen tiedonsiirron, mitä kaksosten välillä tapahtuu [2]. Mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntämiseen digitaalisen kaksosen käytössä syvennyttään tarkemmin luvussa 4. Perusperiaatteet eivät kuitenkaan perustu pelkkään tiedonsiirtoon, vaan ne rakentuvat useiden toisiaan tukevien teknologioiden kokonaisuudesta. Esimerkiksi aiemmin mainittu IoT, tekoäly (AI), koneoppiminen (ML), pilvilaskenta (engl. *cloud computing*) sekä mallinnustekniikat ovat kaikki toimivan digitaalisen kaksosen taustalla [1]. Kuvassa 3.2 on esitetty teknologioiden rooli tapahtumaketjussa, jossa laite ylikuumenee ja digitaalinen kaksosen sammuttaa sen automaattisesti käytössä olevien IoT-anturien avulla.



Kuva 3.2: Eri teknologioiden rooli kaksosten tiedonsiirrossa. Käyttäjä on katkovii- valla, sillä manuaalista työtä voidaan tarvita järjestelmästä riippuen. Lähde: Poh- jautuu lähteeseen [1].

Digitaalisen kaksosen esiasteeksi on myöhemmin määritelty jo 1970-luvulla to- teutettu mallinnus, kun NASA:n Apollo 13 -avaruusalusta jäljiteltiin avaruuslento- jen aikana. Niin kutsuttu esiaste keskittyi lähinnä simulointiin ja mallintamiseen, mutta se oli varhainen monitasoinen järjestelmämalli, joka on myöhemmin kehitty- nyt digitaaliseen kaksoseen. Apollo 13-hankkeessa testattiin eri skenaarioita, joiden avulla miehistö saataisiin turvallisesti maahan. Järjestelmä mallinsi aluksen todellis- ta rakennetta ja ominaisuuksia, mutta reaaliaikaisen mittausdatan lisäksi käytössä oli dataa aikaisemmilta lennoilta ja kaiken datan käsittely vaati raskaita manuaalisia laskentaprosesseja. Järjestelmä ei myöskään sisältänyt automaattista päätöksente- koa tai kaksisuuntaista datavirtaa. [20]

Tulevaisuudessa digitaalista kaksosta käytetään tuotannossa entistä monipuoli- semmin. Teollisuus 5.0:n mukana myös digitaalinen kaksosen kehitty ja sen omi-

naisuudet ovat hyvin saman kaltaisia kuin nykyään. Kaikki reaaliaikainen seuranta, huoltoennakointi, elinkaaren päivitettävyyys sekä simulointi ja optimointi pysyvät ominaisuuksina, mutta toimivat nopeammin sekä luotettavammin. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi kehittyvien teknologioiden, erityisesti AI:n myötä, digitaaliseen kaksoseen suunnitellaan tulevaisuudessa uusia ominaisuuksia. Näitä ovat esimerkiksi yksilöity tuotesuunnittelu sekä ihmisen ja koneen yhteistoiminta. [22], [21]

## 3.2 Mahdollisuudet digitaalisessa kaksosessa

Tässä luvussa tuodaan esille tarkemmin niitä mahdollisuuksia, joita digitaalisella kaksosella on nyt ja tulevaisuudessa. Mahdollisuuksia tarkastellaan eri toimialojen, kuten teollisuuden, älykaupunkien (engl. *smart city*), logistiikan sekä energiantuotannon näkökulmista. Tulevaisuuden näkymät ovat vasta arvioita ja suunnitelmia, sillä niitä ei ole kyetty tuomaan käytäntöön nykyteknologioilla.

**Teollisuudessa** digitaalinen kaksonen on erityisen suosittua aloilla, jotka ovat jollain tavalla liittyvät vaikeisiin olosuhteisiin, kuten puolustusteollisuus, ilmaväli- ja avaruusteollisuus tai energiateollisuus [23]. Näillä aloilla fyysisen järjestelmän testaaminen on yleensä hyvin kallista, vaarallista tai mahdotonta. Vaikka digitaalinen kaksonen onkin lähtöisin avaruusteollisuudesta, on se Teollisuus 4.0:n myötä tullut käyttöön myös muille aloille. Esimerkiksi SAP ja Oracle ovat ottaneet digitaalisen kaksosen käyttöön pilvipohjaisissa ratkaisuissa sekä toiminnanohjauksessa [24]. Tulevaisuudessa digitaalinen kaksonen pystyy myös optimoimaan fyysisen kaksosen suorituskykyä automaattisesti, usealla eri toimialalla. Tämä vaatii kuitenkin vielä kehitysaskelia luotettavuuden ja kaistanleveyden osalta. [20]

**Älykaupungeissa** digitaalisen kaksosen rooli on merkittävä. Se toimii ikään kuin älykaupungin moottorina, jonka avulla voidaan tehdä tarkempia havaintoja kaupungin olosuhteista. Tämän on nähty johtavan siihen, että kansalaisia voidaan

osallistaa kaupunginhallinnon päätöksentekoon ketterästi [25]. Periaatteessa jokaisesta fyysisestä kokonaisuudesta on mahdollista tehdä digitaalinen kaksonen, mutta kaikkia sovelluksia ei ole vielä kokeiltu käytännössä. Suurten kokonaisuuksien digitaalinen mallintaminen on myös haaste. Esimerkiksi tulevaisuuden terahertsiviestinnässä (engl. *terahertz communication*) on ongelmia, sillä sen leveä kaistanleveys on kantamaltaan heikko. Haastetta korostaa ihmisten liikkuminen fyysisten kokonaisuuksien välissä. Tämän vuoksi järjestelmän tulee sisältää tasapainoinen ja automaattinen modulaationhallinta, jonka avulla modulaatio (engl. *modulation*) vaihtuu käyttäjän sijainnin mukaan [20].

**Logistiikassa** digitaalisen kaksosen käyttö liittyy hyvin vahvasti aikataulutukseen. Reaaliaikaisen mallintamisen avulla dataa voidaan vaihtaa konttien, trukkien sekä autojen välillä, jolloin tila- ja aikaresurssien optimointi on mutkattomampaa. Lisäämällä immersiiivisiin ohjaamoympäristöihin (engl. *immersive cockpits*) tekoälyä ja koneoppimista, järjestelmä pystyy automaattisesti ennustamaan riskejä, kuten liikenneonnettomuuksia tai ympäristötekijöistä johtuvia häiriöitä. Suurimpia haasteita logistiikassa ovat laitteiden valtava määrä ja niiden keräämä datamäärä. Tämä, yhdistettynä matalan viiveen vaatimukseen, vaatii valtavasti laskentatehoa, jota IoT-laitteilla ei ole. Tätä on pyritty ratkaisemaan tuomalla laskentaa lähemmäs lähdettä käyttäen reunalaskentaa (engl. *edge computing*). [26]

**Energiantuotannossa** digitaalista kaksosta käytetään hyvin samalla tavalla kuin teollisessa tuotannossa, mutta sovellukset ovat laajempia. Energiantuotannossa on valtava määrä pieniä ja erityisen herkkiä laitteita ja antureita, jotka vaativat tarkkaa mallintamista. Käyttökohteita on esimerkiksi edellä mainittujen laitteiden diagnostiikan kerääminen sekä sähköverkkojen mallintaminen [27]. Haasteita ovat, kuten logistiikassakin, näiden pienien laitteiden laskentateho sekä integraatio eri valmistajien, protokollien, standardien ja datamuotojen suhteen [28].

# 4 Digitaalisen kaksosen optimointi mobiiliverkkoteknologioilla

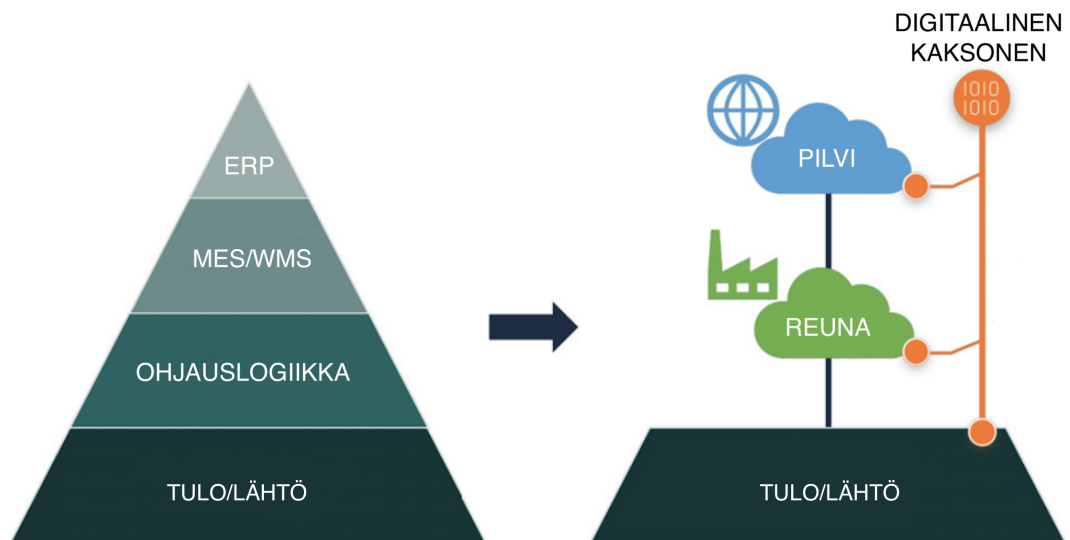
Tutkielmassa on käsitelty jo mobiiliverkkoteknologioita (luku 2) sekä esitelty digitaalisen kaksosen määritelmä ja peruseriaatteet tuotannossa (luku 3). Luku 4 syventyy näiden kahden teknologian vuorovaikutukseen tutkimuskysymysten näkökulmasta. Moderneilla mobiiliverkkoteknologioilla on merkittävä rooli digitaalisen kaksosen toiminnan kannalta. Teknologioiden vuorovaikutusta hankaloittavat kuitenkin pullonkaulat, kuten vaatimukset matalasta viiveestä ja massiivisesta kapasiteetista, sekä yhteyden luotettavuusongelmat. Seuraavaksi tarkastellaan näitä haasteita kolmella eri osa-alueella: luotettavuus (4.1), laaja anturidata (4.2) sekä kapasiteetti (4.3).

## 4.1 Luotettava ja nopea ohjaus

Digitaalisen kaksosen täysi hyödyntäminen tuotannossa edellyttää kriittisten toimintojen toteuttamista. Tällaisia kriittisiä toimintoja ovat esimerkiksi robottien etäohjaus, automaattinen viankorjaus ja turvallisuusjärjestelmät, joissa tiedonsiirron on oltava erittäin luotettavaa ja viiveen oltava matala. URLLC:tä sekä verkon viipalointia käyttäen olisi teknisesti mahdollista kohdentaa yhteys, joka takaisi jopa 99,999% luotettavuuden sekä yhden millisekuntin viiveen normaalioloissa. [29]

Luotettavuus tarkoittaa muutakin. Kuten Waghanna ja kumppanit [30] tutkimuksessaan tuovat ilmi, tietoturva ja yksityisyys on yksi 5G:n heikkouksista siirtäessä Teollisuus 4.0:sta Teollisuus 5.0:aan. Tietoturvan puutteellisuus voi ilmetä yhteyksien manipulaationa sekä palveluiden katkeamisena tai pätkimisenä. Lisäksi arkaluonteinen data voi leviää ulkopuolisille. Tietoturvariskit kasvavat kun uusia vähän käytettyjä teknologioita yhdistetään nykyistä useampaan laitteeseen, sillä se kasvattaa laitevikojen todennäköisyyttä sekä laajentaa mahdollista hyökkäyspinta-alaa. [30]

Lopez ja kumppanit [31] tutkimuksessaan uskovat, että tulevaisuuden tehtailla ohjauslogiikat olisivat pilvipohjaisia, eli paikallista kontrollointia ei enää vaadittaisi. Myös autonomisten robottien (AMR) suhteen tutkimus on optimistinen. Tutkimuksessa tuodaan esille seikka, jonka mukaan autonomiset robotit eivät olisi vain itsenäisiä koneita, vaan jakaisivat tiedon ja "näkömyksen maailmasta" yhteiseen järjestelmään. Molemmat vaativat mobiiliverkkoteknologioilta luotettavaa ja lähes viivettä tiedonsiirtoa. Kuvassa 4.1 on tuotu ilmi teollisuusautomaatiojärjestelmän kehitystä kohti pilvipohjaista ohjauslogiikkaa. [31]



Kuva 4.1: Vasemmalla puolella on nykyinen, hierarkinen ja paikallinen toiminnanohjausjärjestelmä. Oikealla puolella on haluttu tulevaisuuden malli, jossa datan keräämisen jälkeen laskenta tapahtuu lähellä lähdettä sekä pilvessä paikallisen järjestelmän sijaan. Näin ollen digitaalinen kaksonen voidaan suoraan integroida reuna- ja pilvitasoihin. ERP = Toiminnanohjausjärjestelmä, MES/WMS = Tuotannonohjausjärjestelmä/Varastohallintajärjestelmä. Lähde: Mukailtu [31]

Kuten Lopez ja kumppanit [31] toivat ilmi, yllä mainitut ovat osa tulevaisuuden tuotantolinjastoja. Mahdollisiin teknisiin toteutusmalleihin vastaavat epäsuorasti Boopathy ja kumppanit [32]. Heidän tutkimuksessaan uskotaan tekoälyn kykyyn viipaloida verkkoa, jolloin luotettavuus nykyisestä mallista kasvaisi ja viive tippuisi. Verkko suunniteltaisiin mahdollisimman heterogeeniseksi, jolloin eri laitteet pystyisivät kommunikoimaan keskenään vaivattomasti.

Vaikka tutkimuksissa on paljon vastakkainasettelua sekä ratkaisuja, ne ovat suunnattuja eri käyttötarkoituksiin tai niiden tuloksia ei voida skaalata. Myös kaistanleveyksien kasvaessa viive ja eritoten luotettavuus jää hyvin tuotantolinjakohtaiseksi.

## 4.2 Suuret laitemäärät

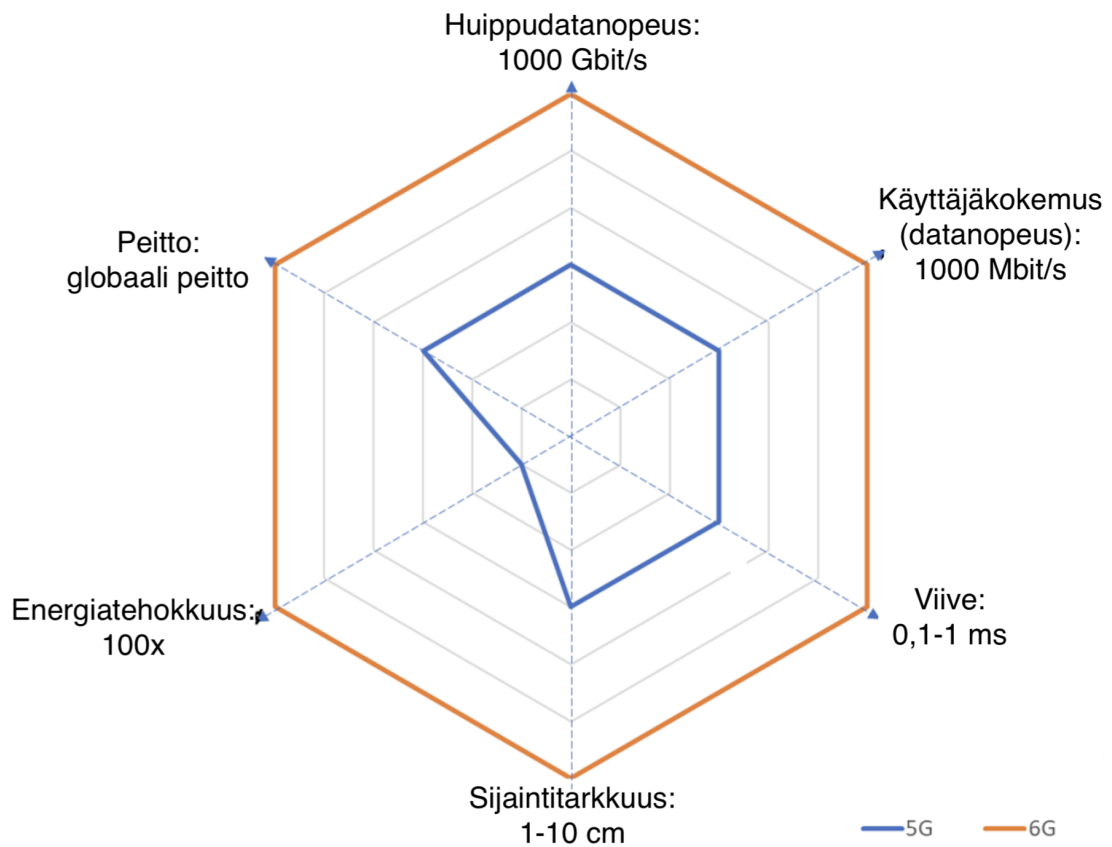
Digitaalisen kaksosen kyky tarjota tarkkaa tietoa fyysisen kaksosen kunnosta perustuu lukuisten IIoT (Industrial Internet of Things) -laitteiden yhteistyöhön ja niiden tuottamaan dataan. Tähän tarpeeseen vastaa 5G:n palveluluokka mMTC. Käytettäessä 5G-yhteyttä, ITU on määrittänyt yhdeksi keskeisimmistä KPI:stä (Key Performance Indicator) laitemääräksi jopa miljoona laitetta neliökilometriä kohden [13]. Tämä laitemäärä mahdollistaa valtaviin kokonaisuuksiin mallintamista.

Miljoonaan laitteeseen neliökilometriä kohden liittyy myös haasteita. Yksi keskeisimmistä haasteista valtavan laitemäärän suhteen on yksittäisen laitteen laskentateho, jota reunalaskennalla pyritään ratkaisemaan [26]. Toinen haaste suuren laitemäärän myötä on datan reaaliaikaisuus, jonka Min ja kumppanit [33] toivat tutkimuksessaan esiin. Heidän tähän ongelmaan ehdottamansa ratkaisut tukevat myös Crespo-Aguadon ja kumppaneiden [26] väitettä siitä, että reunalaskenta on yksi keskeisimmistä ratkaisuista nimenomaan digitaalisen kaksosen ongelmiin laitemäärän suhteen.

Ongelmat eivät jää vain datan laskentatehoon tai reaaliaikaisuuteen. mMTC on optimoitu pienille, epäsäännöllisille datapaketeille joten pitkä akunkesto on mahdollista. Tämä mahdollistaa IIoT-laitteiden asettamisen tuotantolinjoille kustannustehokkaasti ilman jatkuvaa huoltoa. Mutta kuten aiemmin kappaleessa 3.2 mainittiin, eri valmistajien laite-, protokolla- ja standardierot ovat siten merkittävä hidastava tekijä nopeasti muuttuvassa digitaalisten kaksosten ympäristössä [28], joka laitteiden pitkien huoltovälien myötä pahenee entisestään.

Laitemäärä tulee nousemaan. ITU-R ei ole vielä standardisoinut 6G:n TPR:iä (Technical performance requirements), mutta niihin liittyen on tehty arvioita. Esimerkiksi Euroopan parlamentin tutkimuspalvelun (EPRS) tutkimusraportissa [34] ennustetaan, että 6G-mobiiliverkko mahdollistaisi jopa kymmenen miljoonaa laitetta neliökilometriä kohden. Vaikka Euroopan parlamentin raporttia (EPRS) ei pidetä

vertaisarvioituna lähteenä, se sisältää merkittävän arvon (10 miljoonaa laitetta). Tätä arviota tukee Melibarin ja kumppaneiden [35] tieteellinen tutkimus. Artikkelissa mainitaan, että 6G mahdollistaisi tehtäisiin jopa tuhansien robottien kokonaisuuksia, mikä vastaisi anturimäärässä reilusti yli miljoonaa anturia. Vaikka moni tutkimus osoittaa 6G:n olevan pelastavassa roolissa digitaalisten verkkojen suoriutumiseen teollisuusympäristöissä, ei se itsessään ratkaise nykyisiä 5G-mobiiliverkkojen ongelmia.



Kuva 4.2: EPRS:n esittämät suorituskykytavoitteet 6G:lle suhteutettuna nykyisiin 5G:n ominaisuuksiin. Lähde: Mukailtu [36].

## 4.3 Kapasiteetti

Digitaalisen kaksosen kohdalla suuri kapasiteetti liittyy vahvasti kaistanleveyteen. Mitä leveämpi kaista on, sitä enemmän dataa voidaan siirtää. Raskaita datavirtoja synnyttää esimerkiksi korkearesoluutioinen mallinnus tai tarkka videokuva, johon 5G-palveluluokista vastauksena on eMBB [1]. ITU-R on määritellyt 5G:lle datansiirron saralla jopa useiden satojen megahertsien (MHz) taajuskaistoja sekä yli 10 Gbit/s nopeuksia [14].

Komatsu ja kumppanit [37] ovat tutkimuksessaan tuoneet esiin eMBB:n haasteita. Tutkimuksessa verrattiin URLLC- sekä eMBB-viipaleiden reagoitua lisäkuormitukseen. Tutkimuksessa eMBB- sekä URLLC-viipaleiden kanssa samaan verkkoon tuotiin kolmas käyttäjälaite, joka tuotti 250 Mbit/s lisäkuormaa, jolloin kaistanleveys pieneni ja URLLC-viipale pysyi lähes stabiilina. eMBB-viipaleen huippudatanopeus laski noin 172 Mbit/s -> 107 Mbit/s ja latenssi kasvoi 9,9 ms -> 14,3 ms. Tästä voidaan päätellä, että eMBB-viipale on herkkä lisäkuormalle, toisin kuin lähes stabiilina pysynyt URLLC-viipale.

Toisaalta, Ticku ja kumppanit [8] kertovat artikkelissaan eri taajuusalueista, joita 5G mahdollistaa. Näistä erityisesti korkean taajuuden mmWave-alue (millimeter wave), joka tarjoaa merkittävän kapasiteetin kasvun. Leveät taajuskaistat ja sitä kautta valtavammat datamäärät tekevät siitä lupaavan ratkaisun 5G:n ja 6G:n kapasiteettiongelmien hallintaan. 5G mmWave-teknologia ei kuitenkaan ole tällä hetkellä täydellinen ratkaisu, sillä sen heikko peitto rajoittaa saatavuuden vain paikallisesti rajatuille, suuren kapasiteetin alueille. Han ja kumppanit [3] toivat Hexa-X-hankkeessaan ilmi kuusi digitaalisten kaksosen tulevaisuuden haastetta, joista erityisesti äärimmäisen korkean suorituskyvyn palvelut ovat yksi keskeisimmistä. Näiden haasteiden ratkaisemiseen on kuitenkin kehitteillä uusia teknologioita.

Uusista teknologioista kapasiteetin suhteen merkittävimpiä ovat Hexa-X-tutkimuksessakin esiin tuodut, aiemmin mainitut terahertsitaajuuudet [3]. Terahert-

---

sitaajuuksia puoltaa myös Bhat ja kumppaneiden tuottama tutkimus [11], jossa terahertsitaajuuksien kerrotaan olevan keskiössä tulevaisuuden tutkimuksissa ja 6G:n kehityksessä. Terahertsitaajuuksilla on samassa tutkimuksessa puhuttu päästävän jopa 1000 Gbit/s nopeuksiin. Nämä nopeukset vaativat tosin niin leveän kaistan, että sen eteen on tehtävä vielä valtava määrä tutkimusta, jotta teknologiaa voidaan oikeasti tuoda käytäntöön. Tutkimuksen keskiössä on samat ongelmakohdat kuin mmWave-teknologialla, ja terahertsitaajuudet vaativat usein suoran näköyhteyden (Line-of-Sight, LoS) toimiakseen. Näköyhteyden toteuttaminen komplekseissa tuotantotiloissa on haastavaa.

## 5 Pohdinta

Yleisellä tasolla tutkimusta digitaalisista kaksosista on hyvinkin paljon ja se tuntuu olevan trendaava aihe monella toimialalla. Nimenomaan tuotantoon, tai varsinkaan mekaaniseen tuotantoon on tehty hyvin vähän tutkimusta. Suurin osa mekaaniseen tuotantoon viittaavista tutkimuksista pohjautuu arvioihin, joista on tuotettu ratkaisuja. Konkreettiset esimerkit ovat vajaita, jolloin merkittäviä rajoittavia tekijöitä jää huomiotta. Esimerkkien vajavaisuus perustuu pitkälti kustannuksiin. Kokonaisen järjestelmien rakentaminen massiivisissa tuotantolinjoissa on erittäin kallista, minkä takia tutkimukset pohjautuvat arvioituun dataan ja laskelmiin. Tästä johtuen on hyvin todennäköistä, että tutkimukset ovat kokonaisuudessaan liian optimistisia. Todellisuus tuo mukanaan muuttujia, joita ei voida kaikkia havainnoida optimiolosuhteissa tehdyissä laskelmissa.

Eryteisesti tutkimusten haasteissa korostuivat samat trendit ja kokonaisuudet, mitkä on kylläkin hyvin yleistettäviä alasta riippumatta. 5G on mobiiliverkkoteknologioista ymmärrettävästi paljon enemmän tutkittu, ja 6G:n tutkimuksissa toistui viittaukset 5G:hen. Mitä pidemmälle 6G:n laskelmia jatketaan, sitä suurempi niihin kohdistuva virhemarginaali on.

Tutkimusten sekä tulevaisuuden suunnan arviointia tämän aihealueen ympärillä helpottaa huomattavasti se, että lopullisen määritelmän ensin käyttöskenaarioille ja sen jälkeen palveluluokille tekee yksi ja sama taho. Tämä taho on tutkimuksen toisessa luvussa esitelty ITU-R. Vallan keskittäminen ja konsensushakuisuus lisää-

vät yhtenäisyyttä sekä ennakoitavuutta. Lisäksi vallan keskittäminen vähentää sitä ongelmaa, jossa digitaalisten kaksosten tutkimukset poikkeaisivat huomattavasti toisistaan nimenomaan mobiiliverkkoteknologioiden osalta.

Toisaalta vallan keskittäminen ITU-R:lle tuo mukanaan myös haasteita. ITU-R on YK:n alla toimiva järjestö, jossa on mukana 193 jäsenvaltiota [14]. Tämän vuoksi uusien teknologioiden standardointityö on erittäin hidasta, jolla nykypäivänä voi olla vaikutusta jo koko teknologiakehityksen mittakaavassa. Lisäksi ITU-R:n ehdottomat standardit voivat johtaa siihen, että teknisesti ylivoimaiset, mutta standardista poikkeavat ratkaisut jäävät syrjään, koska ne eivät sovi globaaliin kehitykseen.

Todelliset haasteet mobiiliverkkoteknologioissa eivät välttämättä ole vain 6G:n teknisissä tavoitteissa, kuten viiveessä tai kantamassa. Kuten tutkimuksen neljännessä luvussa on osoitettu, suurimmat esteet ovat integraatiossa. Todellinen tuotantolaitos on täynnä eri-ikäisiä laitteita, eri valmistajien standardeja ja protokollavii-dakkoa, jota optimistiset tutkimukset eivät huomioi. Lisäksi simulaatiot ja laskelmat eivät huomioi tuotantolaitosten uniikkeja, fyysisiä rajoitteita. Vaikka 6G-verkko tarjoaisi teoriassa täydellisen suorituskyvyn, se ei yksinään ratkaise tätä olemassa olevan infrastruktuurin perimmäistä haastetta.

Standardoinnin puute ja tuotannon nykyiset integraatio-ongelmat voivat maksaa yrityksille pitkällä aikavälillä valtavasti, jonka vuoksi digitaalisen kaksosen tarvetta on hyvin haastavaa arvioida. Toisaalta, uniikit implementointiympärisöt tarkoittavat myös uniikkeja asennuskustannuksia. Ongelmien vuoksi menetetty tuotto sekä kustannusten suhde voisikin olla juuri se mittari, jonka pohjalta päätös digitaalisen kaksosen käyttöönottoon tulisi tehdä.

## 6 Yhteenveto

Tällä hetkellä tutkimus keskittyy hyvin pitkälti aloihin, joissa olosuhteet ovat vaihtelevia ja jossa digitaalisen kaksosen hyöty on todistamattakin selvää. Vaikka tuotanto on käsitteenä laaja, on sitä vuosien 2024 ja 2025 aikana tuotu lähemmäs käytännönläheisempiä tuotannon aloja. Näiden saralla tutkimusta on saatu paljon aikaiseksi. Esimerkiksi Strinatin ja Nquyenin (ja kumppaneidensa) tutkimukset [6], [1] ovat tuoneet valtavasti lisäarvoa tutkimukseen. Mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntämistä rajoittavia tekijöitä tarkasteltaessa törmätään usein siihen tosiasiaan, että jokainen tuotantolaitos sekä järjestelmä on fyysisesti erilainen. Lisäksi, kuten Kharbouch ja kumppanit [28] tutkimuksessa toivat esiin, eri ikäisten ja mallisten laitteiden ominaisuudet, standardit sekä protokollat sekoittavat todellisuudessa pakkaa. Näin ollen voidaan todeta, että suurimmat suorituskyvyn ja laadun optimoinnin esteet ovat kaikissa tuotannoissa jo valmiina. Mikäli jokainen mallinnettava järjestelmä toimisi optimiolosuhteissa huippusuorituskyvyllä, tekniseksi haasteeksi muodostuu muut asiat kuin mobiiliverkot. Varsinkin, mikäli 6G:n kunnianhimoiset suorituskykytaivoitteet toteutuisivat, katseet kohdistuisivat esimerkiksi IoT-laitteiden laskentakykyyn, tietoturvaan ja protokollaviidakkoon [3].

Liu ja kumppanit [13] ovat tutkimuksessaan mallintaneet ansiokkaasti modernien mobiiliverkkoteknologioiden perusteita. Vaikka heidän työnsä ei ole vertaisarvioitu, samat TPR-arvot ovat havaittavissa myös muissa tutkimuksissa. Todellisuudessa mobiiliverkot voivat tehostaa digitaalisen kaksosen suorituskykyä ja luotettavuut-

ta tuotantolinjoilla verkon ominaisuuksia hyödyntämällä. Luotettavuuden keskiössä on verkon viipalointi, joka optimoituna ja mahdollisesti tulevaisuudessa tekoälyn toteuttamana pystyy vastaamaan luvattuun 99,999% luotettavuuteen 5G:n osalta sekä 99,99999% luotettavuuteen 6G:n osalta. Suorituskykyä tarkastellessa viipaloinnin tukena ratkaisevaan rooliin nousee säteenmuodostus. Säteenmuodostus mahdollistaa hyvin optimoidun verkkoviipaleen kohdistamisen niin tarkasti laitteeseen, että lähietäisyyksillä nopeus ja viive eivät ole enää pullonkauloja, vaan olosuhteet ovat niin lähellä aiemmin mainittuja optimiolosuhteita, että pullonkaulat syntyvät muualle. Tutkimuskysymyksiin voidaan tiivistetysti vastata seuraavasti:

**TK1:** Mobiiliverkkoteknologioiden hyödyntäminen ei todellisuudessa ole yksiselitteisesti kiinni teknologian ominaisuuksista, vaan digitaalisen kaksosen vastaparin, fyysisen kaksosen ominaisuuksista. Nämä fyysisen kaksosen ominaisuudet rajoittavat mobiiliverkkoteknologioita kokonaisvaltaisesti, mutta eritoten luotettavuuden ja suorituskyvyn osalta.

**TK2:** Modernit mobiiliverkkoteknologiat voivat tehostaa digitaalisen kaksosen suorituskykyä huomattavasti, hyödyntämällä tekoälypohjaista verkon viipalointia sekä säteenmuodostusta, jolloin mobiiliverkon resurssit voidaan optimoida parhaalla mahdollisella tavalla juuri tietyn tuotantolinjan tarpeisiin, ja näin luotettavuutta tehostetaan ja viivettä pienennetään. Myös reunalaskennan mahdollistama laskentatehon kasvu tulee nostamaan liikutettavan datan määrää ja nopeutta.

# Lähdeluettelo

- [1] Huan X. Nguyen, Ramona Trestian, Duc To ja Mallik Tatipamula, "Digital Twin for 5G and Beyond", *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, nro 2, s. 10–15, 2021. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000343.
- [2] Sachin Kumar Bhoi, Sajib Chakraborty, Farzad Hosseinabadi, Mohamed Amine Frikha, Gamze Egin Martin, Aldo Sorniotti ja Omar Hegazy, "Overview of Digital Twin Development in Power Electronics", *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2025. DOI: 10.1109/OJPEL.2025.3615238.
- [3] Bin Han, Mohammad Asif Habibi, Bjoern Richerzhagen, Kim Schindhelm, Florian Zeiger, Fabrizio Lamberti, Filippo Gabriele Praticò, Karthik Upadhya, Charalampos Korovesis, Ioannis-Prodromos Belikaidis, Panagiotis Demestichas, Siyu Yuan ja Hans D. Schotten, "Digital Twins for Industry 4.0 in the 6G Era", *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 4, s. 820–835, 2023. DOI: 10.1109/OJVT.2023.3325382.
- [4] Shimaa A. Abdel Hakeem, Hanan H. Hussein ja HyungWon Kim, "Vision and research directions of 6G technologies and applications", *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, nro 6, s. 2419–2442, 2022. DOI: 10.1016/j.jksuci.2022.03.019.
- [5] Taofeek Olayinka Agboola, Job Adegede, Taiwo Gabriel Omomule, Oyekunle Claudius Oyeniran ja Lemuel Omotayo Aina, "Review of mobile network:

- Evolution from 5G to 6G”, *Computer Engineering and Intelligent Systems*, vol. 15, nro 1, s. 49, 2024. DOI: 10.7176/CEIS/15-1-06.
- [6] Emilio Calvanese Strinati, Thomas Haustein, Mickael Maman, Wilhelm Keusgen, Sven Wittig, Mathis Schmieder, Sergio Barbarossa, Mattia Merluzzi, Henrik Klessig, Fabio Giust, Daniele Ronzani, Shuo-Peng Liang, Jack Shi-Jie Luo, Cheng-Yi Chien, Jiun-Cheng Huang, Jen-Sheng Huang ja Tzu-Ya Wang, ”Beyond 5G Private Networks: the 5G CONNI Perspective”, *2020 IEEE Globecom Workshops GC Wkshps*, Taipei, Taiwan, 2020, s. 1–6. DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367460.
- [7] Theodore S. Rappaport, Shu Sun, Rimma Mayzus, Hang Zhao, Yaniv Azar, Kevin Wang, George N. Wong, Jocelyn K. Schulz, Mathew Samimi ja Felix Gutierrez, ”Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!”, *IEEE Access*, vol. 1, s. 335–349, 2013. DOI: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [8] Amrita Ticku, Sagar Sidana, Anurag Sinha, S Sathesh, Manas Uniyal, Biresh Kumar, Raj Shekhar Sinha, Petheru Raj, Ahmed Al-Khayyat ja Mansi Sikarwar, ”Next-Gen IoT: 5G Realities and 6G Possibilities”, *2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Kamand, Intia, 2024, s. 1–8. DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10724540.
- [9] Ramiro Ramirez, Chien-Yi Huang ja Shu-Hao Liang, ”5G Digital Twin: A Study of Enabling Technologies”, *Applied Sciences-Basel*, vol. 12, nro 15, s. 7794, 2022. DOI: 10.3390/app12157794.
- [10] Yashwanth Vankadara, Pankaj Pathak, P Ashok ja Samaya Pillai, ”6G Revolution: Redefining Communication Systems”, *2024 International Conference on*

- Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES)*, Tumakuru, Intia, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICSSES62373.2024.10561292.
- [11] Jagadeesha R. Bhat ja Salman A. Alqahtani, ”6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective”, *IEEE Access*, vol. 9, s. 43 134–43 167, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3054833.
- [12] Qi Guo, Fengxiao Tang ja Nei Kato, ”Federated Reinforcement Learning-Based Resource Allocation for D2D-Aided Digital Twin Edge Networks in 6G Industrial IoT”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 19, nro 5, s. 7228–7236, 2023. DOI: 10.1109/TII.2022.3227655.
- [13] Ruiqi Liu, Leyi Zhang, Ruyue Yu-Ngok Li ja Marco Di Renzo, *The ITU Vision and Framework for 6G: Scenarios, Capabilities and Enablers*, arXiv:2305.13887 [cs], 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2305.13887.
- [14] International Telecommunication Union, *ITU-R Basics*, <https://www.itu.int/en/itu-r/seminars/rrs/documents/intro/iut-r-basics.pdf>, viitattu: 22.11.2025.
- [15] Daniel Lindenschmitt, Jan Mertes, Christian Schellenberger, Marius Schmitz, Bin Han, Jan C. Aurich ja Hans D. Schotten, ”6G Underlayer Network Concepts for Ultra Reliable and Low Latency Communication in Manufacturing”, *European Wireless 2023; 28th European Wireless Conference*, Rooma, Italia, 2023, s. 26–30. url: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10461437>.
- [16] Junming Li, Shuping Dang, Zhenrong Zhang ja Lie Wang, ”When Industrial Metaverse Meets 6G: The Next Revolution and Deployment Challenges”, *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Dubai, Yhdistyneet arabiemiirikunnat, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10570966.

- 
- [17] Md Tariqul Islam, Kamelia Sepanloo, Seonho Woo, Seung Ho Woo ja Young-Jun Son, "A Review of the Industry 4.0 to 5.0 Transition: Exploring the Intersection, Challenges, and Opportunities of Technology and Human–Machine Collaboration", *Machines*, vol. 13, nro 4, s. 267, 2025. DOI: 10.3390/machines13040267.
- [18] Zied Ennaceur, Mounir Bensalem, Cao Vien Phung, André C. Drummond ja Admela Jukan, "Enabling 6G Campus Networks Intelligent Control with Digital Twin: A case study", *NOMS 2024-2024 IEEE Network Operations and Management Symposium*, Seoul, Etelä-Korea, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/NOMS59830.2024.10575904.
- [19] Stefan Mihai, Mahnoor Yaqoob, Dang V. Hung, William Davis, Praveer Towakel, Mohsin Raza, Mehmet Karamanoglu, Balbir Barn, Dattaprasad Shetve, Raja V. Prasad, Hrishikesh Venkataraman, Ramona Trestian ja Huan X. Nguyen, "Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, nro 4, s. 2255–2291, 2022. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773.
- [20] Antonino Masaracchia, Van-Linh Nguyen, Daniel Benevides da Costa, Elif Ak, Berk Canberk, Vishal Sharma ja Trung Q. Duong, "Toward 6G-Enabled URLLCs: Digital Twin, Open Ran, and Semantic Communications", *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 9, nro 1, s. 13–20, 2025. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2300054.
- [21] Gordana Gardašević ja Dragorad Milovanovic, "5G-Advanced Redcap and Digital Twin Technologies for Emerging IiOT Applications", *2025 31st International Conference on Telecommunications (ICT)*, Budva, Montenegro, 2025, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICT65093.2025.11046242.

- [22] Raffik R, Rithish Ramamoorthy Sathya, Vaishali V, Balavedhaa S ja Jyothi Lakshmi N, "Industry 5.0: Enhancing Human-Robot Collaboration through Collaborative Robots – A Review", *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India, 2023, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICAECA56562.2023.10201120.
- [23] Adwait Inamdar, Przemyslaw Gromala, Willem van Driel ja GuoQi Zhang, *Making the Digital Twin Work for Mission-Critical Electronics*, Saatavilla: <https://eps.ieee.org/publications/enews/july-2022/900-making-the-digital-twin-work-for-mission-critical-electronics.html>, 2022.
- [24] Qinglin Qi, Fei Tao, Ying Zuo ja Dongming Zhao, "Digital Twin Service towards Smart Manufacturing", *Procedia CIRP*, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, vol. 72, s. 237–242, 2018. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.103.
- [25] Tianhu Deng, Keren Zhang ja Zuo-Jun Shen, "A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities", *Journal of Management Science and Engineering*, vol. 6, nro 2, s. 125–134, 2021. DOI: 10.1016/j.jmse.2021.03.003.
- [26] Maria Crespo-Aguado, Raul Lozano, Fernando Hernandez-Gobertti, Nuria Molner ja David Gomez-Barquero, "Flexible Hyper-Distributed IoT-Edge-Cloud Platform for Real-Time Digital Twin Applications on 6G-Intended Testbeds for Logistics and Industry", *Future Internet*, vol. 16, nro 11, s. 431, 2024. DOI: 10.3390/fi16110431.
- [27] Jianping Huang, Linlin Zhao, Fuwang Wei ja Bingwen Cao, "The Application of Digital Twin on Power Industry", *6th International Conference on Advances in Energy Resources and Environment Engineering*, vol. 647, Seattle, Washing-

- ton, Yhdysvallat: IoP Publishing Ltd, 2021, s. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/647/1/012015.
- [28] Abdelhak Kharbouch, Farid Hamzeh Aghdam, Narges Gholipoor ja Mehdi Rasti, "Digital-Twin-6g Empowered Future Smart Grid Applications", *IEEE Wireless Communications*, vol. 32, nro 3, s. 90–97, 2025. DOI: 10.1109/MWC.001.2400466.
- [29] Guillermo Pocovi, Troels Kolding ja Klaus I. Pedersen, "On the Cost of Achieving Downlink Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 5G Networks", *IEEE Access*, vol. 10, s. 29 506–29 513, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3158361.
- [30] Pranav Waghanna, Akash Reddy, Sarthak Deshpande, Siddhant Chavan, Vishal R. Jaiswal ja Vishal Naranje, "Effects of Adopting Industry 4.0 on a Manufacturing Plant", *2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, Intia, 2024, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICRITO61523.2024.10522189.
- [31] Melisa López, Sebastian Bro Damsgaard, Akif Kabaci, Weifan Zhang, Himanshu Sharma, Sepideh Valiollahi, Ignacio Rodríguez ja Preben Mogensen, "Towards the 5G-Enabled Factories of the Future", *2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Lemgo, Saksa, 2023, s. 1–8. DOI: 10.1109/INDIN51400.2023.10217837.
- [32] Prabadevi Boopathy, Natarajan Deepa, Praveen Kumar Reddy Maddikunta, Nancy Victor, Thippa Reddy Gadekallu, Gokul Yenduri, Wei Wang, Quoc-Viet Pham, Thien Huynh-The ja Madhusanka Liyanage, "The Metaverse for Industry 5.0 in NextG Communications: Potential Applications and Future Challenges", *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. 6, s. 4–24, 2025. DOI: 10.1109/OJCS.2024.3497335.

- [33] Ziran Min, Shuang Zhou, Zhuangwei Kang, Shashank Shekhar, Charif Mahmoudi, Swapna Gokhale ja Aniruddha Gokhale, "Managing and Optimizing 5G & Beyond Network Resources for Multi-Task Digital Twin Applications in Industry 4.0", *2023 IEEE 26th International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, Nashville, Tennessee, Yhdysvallat, 2023, s. 220–223. DOI: 10.1109/ISORC58943.2023.00039.
- [34] Stefano De Luca European Parliamentary Research Service, "6G: The next frontier in mobile communication", *European Parliament*, 2024, viitattu: 03.11.2025. url: <https://www.europarl.europa.eu/thinktank>.
- [35] Wesal Melibari, Hamzah Baodhah ja Nadine Akkari, "IIoT-Based Industry Transformation In Saudi Arabia", *2023 1st International Conference on Advanced Innovations in Smart Cities (ICAISC)*, Jeddah, Saudi Arabia, 2023, s. 1–6. DOI: 10.1109/ICAISC56366.2023.10085304.
- [36] Jean-Luc Lemmens, *How and when will 6G emerge from 5G? Milestones and next steps – How can Europe stay ahead in the 6G race?*, raportti No. M00079, Montpellier, Ranska, Heinäkuu, 2023.
- [37] Kenichi Komatsu, Antti Pauanne, Tuomo Hänninen, Juha Kela, Tapani Rantakokko, Esa Piri, Jarmo Prokkola, Paulo Marques, Tiago Alves, Jussi Haapola ja Ari Pouttu, "Addressing 3D Digital Twin in Xr Remote Fab Lab Over Sliced 5G Networks", *2025 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Poznan, Puola, 2025, s. 506–511. DOI: 10.1109/EuCNC/6GSummit63408.2025.11036986.