



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Tekoälyn hyödyntäminen mobiiliverkon toiminnan optimoinnissa ja kehittämisessä

Tietojärjestelmätieteen kandidaatintutkielma

Laatija:

Veikko Kivisaari

Ohjaaja:

FM Minna Rantanen

9.5.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandiditutkielma

Oppiaine: Tietojärjestelmätiede

Tekijä: Veikko Kivisaari

Otsikko: Tekoälyn hyödyntäminen mobiiliverkon toiminnan optimoinnissa ja kehittämisessä

Ohjaaja: FM Minna Rantanen

Sivumäärä: 38 sivua

Päivämäärä: 9.5.2024

Viime vuosikymmenen aikana mobiiliverkkoteknologia on kehittynyt runsaasti. Mobiiliverkkoihin yhdistettyjen laitteiden määrä ja verkkojen tarjoamat yhteysnopeudet ovat kasvaneet nopeasti. Tekoälyä hyödynnetään mobiiliverkkojen toiminnan tukena yhä enemmän, ja tekoälyn hyödyntämisen määrä mobiiliverkkoteknologiassa tulee moninkertaistumaan kuluvan vuosikymmenen loppuun mennessä. Vuonna 2020, telekommunikaatioalan toimijoista 63,5 % oli alkanut investoida koneoppimisen käyttökohteiden kartoittamiseen mobiiliverkkoteknologiassa.

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on kartoittaa, miten tekoälyä voidaan hyödyntää mobiiliverkkoteknologian toiminnan tehostamisessa. Tutkielmassa keskitytään aluksi tekoälyn määrittelmään sekä mobiiliverkkoteknologian kehitykseen. Tutkielmassa käsitellään myös tekoälyn merkitystä mobiiliverkkojen toiminnalle sekä tekoälyn hyödyntämistä 5G verkon eri toimintojen ja käyttäjäkokemuksen optimointiin. Lopuksi tutkielmassa käsitellään 6G mobiiliverkkoteknologiaa sekä tekoälyn roolia seuraavan sukupolven mobiiliverkoissa. Tutkielman tarkoituksena on antaa laaja yleiskuva tekoälystä, mobiiliverkoista sekä siitä miten tekoäly vaikuttaa mobiiliverkkojen toimintaan. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, ja aineistona on käytetty aihetta käsitteleviä tieteellisiä artikkeleita ja muuta aiheeseen liittyvää tieteellistä kirjallisuutta.

Ensimmäisen sukupolven mobiiliverkot otettiin käyttöön vuonna 1979, ja siitä lähtien uusi mobiiliverkkosukupolvi on ilmestynyt noin kymmenen vuoden välein. 5G mobiiliverkko toi mukanaan useita teknologisia innovaatioita kuten mm. verkon viipalointi, keilanmuodostus, mmWave-lähetystaajuusalue sekä MIMO-antennitekniikka. Uusien teknologisten innovaatioiden myötä myös mobiiliverkon kuljettaman tietoliikenteen määrä on moninkertaistunut, joka tekee verkon tuottaman datan analysoinnista yhä työläämpää. Vastaukseksi kasvavan datamäärän analysointiin on esitetty tekoälyalgoritmien hyödyntämistä mobiiliverkkoteknologian tukena.

Tekoälyn hyödyntäminen mobiiliverkkoteknologian tukena on aktiivisesti tutkittu aihe. 5G mobiiliverkkoteknologiassa tekoälyä ei toistaiseksi kyetä hyödyntämään verkon toiminnan automatisointiin, mutta sille löytyy siitä huolimatta useita käyttökohteita. Käyttökohteita ovat mm. signaalin reitityksen optimointi, verkon energiatehokkuuden parantaminen, verkon kuormituksen tasapainotus sekä MIMO-antennien toiminnan tehostaminen. Tekoälyn merkitys 5G teknologiassa tulee kasvamaan tulevaisuudessa, kun verkon kuljettama ja sen eri osien tuottama datamäärä kasvaa entisestään.

Kuudennen sukupolven mobiiliverkkojen voi olettaa ilmestyvän vuoden 2030 tienoilla. 6G verkkojen tuomia uudistuksia olisivat mm. yli teratavun yhteysnopeudet, alle yhden millisekunnin vasteaika sekä mobiiliverkkojen laajeneminen myös avaruuteen satelliittien integraation kautta. Tekoälyn rooli 6G mobiiliverkkoteknologiassa on erittäin keskeinen. Tekoäly on määrää integroida osaksi 6G verkon rakennetta alusta pitäen, joka mahdollistaa mobiiliverkon älyllistämisen. Älykäs mobiiliverkko pystyy säätelemään verkon toimintaa autonomisesti siten, että palvelun laatu paranee ja verkon käytöstä aiheutuvat kustannukset alenevat samanaikaisesti.

Avainsanat: mobiiliverkot, tekoälyn sovellukset, koneoppiminen, syväoppiminen, 5G, 6G

SISÄLLYS

1	Johdanto	7
1.1	Tausta	7
1.2	Tutkielman rajaus ja tutkimuskysymykset	7
2	Tekoäly ja mobiiliverkot	9
2.1	Tekoälystä yleisesti	9
2.2	Mobiiliverkoista yleisesti	12
2.3	Tekoälyn merkitys mobiiliverkkojen toiminnalle	18
3	Tekoälyn hyödyntäminen 5G-mobiiliverkoissa	20
3.1	Käyttäjäkokemuksen ja toiminnan optimointi	20
3.1.1	Signaalin reititys ja verkon energiatehokkuus	20
3.1.2	Verkon viipalointi	21
3.1.3	Verkkoliikenteen ennakointi ja verkon kuormituksen tasapainotus	22
3.1.4	Tukiaseman vaihto	23
3.1.5	MIMO-tekniikka	24
3.1.6	Verkon turvallisuus ja ylläpito	25
3.2	Tekoälyn hyödyntämisen haasteet	26
4	6G ja Tekoäly	28
4.1	6G teknologiasta yleisesti	28
4.2	Tekoälyn rooli 6G teknologian kehityksessä	29
5	Yhteenveto	30
	Lähteet	33

KUVIOT

- Kuvio 1: Tekoälyn käsitteet ja niiden suhde toisiinsa (Mukaillen Kreutzer & Sirrenberg, 2019) 9
- Kuvio 2: Kuusikulmion muotoisten solujen tehokkuus (Mukaillen Hodara & Skaljo, 2021) 14
- Kuvio 3: Ympyränmuotoisten solujen tehokkuustappio (Mukaillen Hodara & Skaljo, 2021) 14
- Kuva 4: Perinteisen signaalin lähetystavan (vas.) ja keilanmuodostuksen välinen ero havainnollistettuna (Mukaillen Shahan Shah, 2022) 17

1 Johdanto

1.1 Tausta

Viimeisen vuosikymmenen aikana tietokoneiden laskentateho, datan määrä, internet-yhteyksien nopeudet, laskevat kustannukset sekä internetiin yhdistettyjen sensoreiden määrä ovat kasvaneet jatkuvasti. Tämä kasvu on aiheuttanut sen, että useiden alojen liiketoiminnassa on alettu hyödyntämään tekoälyä ja koneoppimista. (Balmer ym., 2020.) Viimeisen vuosikymmenen aikana erityisesti telekommunikaatioala on muuttunut radikaalisti ja alan muutos on asettanut teleoperaattorit tilanteeseen, jossa liiketoiminnan perustoimintojen automaatio on välttämätöntä kasvun ja kilpailukyvyyn säilyttämiseksi. Syynä tilanteeseen on kasvaneen kilpailun myötä halvemmat kuluttajahinnat sekä uusien datan prosessointitapojen kehittämisen kasvavat kustannukset. (Tapia ym., 2018.)

Viime aikoina myös tekoälyn tutkimuksen saralla on saavutettu merkittäviä edistysaskeleita. 5G teknologian myötä yhteysnopeudet sekä kaistanleveydet ovat kasvaneet huomattavasti. Nämä muutokset vaikuttavat tekoälyn käytännöllisyyteen telekommunikaatioalalla merkittävästi. (Khedkar ym., 2023.) Vuonna 2020 telekommunikaatioalan toimijoista 63,5 % oli alkanut investoida koneoppimisen käyttökohteiden kartoittamiseen mobiiliverkkoteknologiassa (Mahmoud & Ismail, 2020). Vuoden 2022 tekoälymarkkinoiden arvo telekommunikaatioalalla oli 1,32 miljardia Yhdysvaltain dollaria ja markkinoiden arvon ennustetaan nousevan 15,78 miljardiin dollariin vuoteen 2030 mennessä. Vuosien 2024–2032 välillä odotetaan yhdistetyn vuosikasvun olevan 27,9 %. (Dhapte, 2024.) Voidaan siis todeta, että tekoälyn käyttö mobiiliverkkojen toiminnassa tulee moninkertaistumaan kuluvan vuosikymmenen loppuun mennessä.

1.2 Tutkielman rajaus ja tutkimuskysymykset

Tutkielman tarkoituksena on perehtyä tekoälyn käyttömahdollisuuksiin juuri mobiiliverkkojen toiminnan optimoinnin ja kehityksen apuna. Aihe on relevantti, koska kyseisestä aiheesta on tehty suomenkielistä tutkimusta niukasti, ja koska tekoäly on ajankohtainen aihe telekommunikaatioalan kannalta. Tutkielmassa keskitytään 5G ja 6G mobiiliverkkoihin ja niiden toiminnan optimointiin ja kehitykseen tekoälyn avulla. Tutkielman tarkoituksena on luoda lukijalle hieman pintaa syvempi käsitys

mobiiliverkkojen toiminnasta, ja siitä millä eri tavoin tekoälyä hyödynnetään 5G teknologiassa käyttäjäkokemuksen optimointiin ja verkon toiminnan tehostamiseen. Lisäksi tutkielman tarkoituksena on luoda lukijalle pintapuolinen käsitys 6G mobiiliverkoista sekä tekoälyn roolista seuraavan sukupolven mobiiliverkkoteknologian kannalta.

Tutkielman tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Mitä tekoäly on, miten mobiiliverkkoteknologia on kehittynyt ja miksi tekoäly on mobiiliverkkojen kannalta merkittävä käsite?
2. Miten tekoälyä voidaan hyödyntää 5G-mobiiliverkon toiminnan ja käyttäjäkokemuksen optimoinnin apuvälineenä?
3. Mitä uudistuksia kuudennen sukupolven mobiiliverkoilta odotetaan ja mikä on tekoälyn rooli 6G mobiiliverkkoteknologiassa?

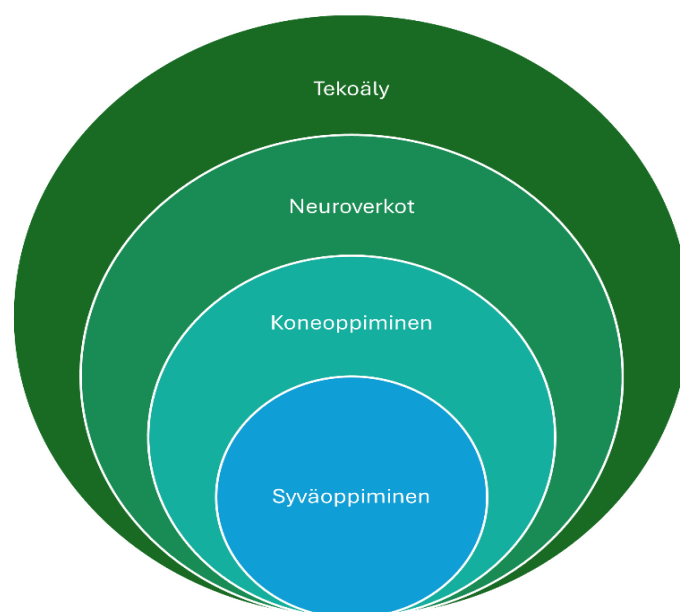
Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, ja käytetty aineisto koostuu mobiiliverkkoja ja tekoälyä käsittelevistä tieteellisistä artikkeleista, sekä muusta aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta. Tutkielman rakenne etenee seuraavasti: tutkielman toisessa luvussa käsitellään tekoälyä ja mobiiliverkkojen toimintaa yleisemmällä tasolla sekä tekoälyn merkitystä mobiiliverkkojen toiminnalle. Kolmas luku käsittelee tekoälyn hyödyntämistä 5G-mobiiliverkkojen toiminnan tukena. Neljäs luku käsittelee 6G mobiiliverkkoteknologiaa sekä tekoälyn ja 6G teknologian suhdetta. Viides ja viimeinen luku sisältää johtopäätökset sekä tutkielman yhteenvedon.

2 Tekoäly ja mobiiliverkot

2.1 Tekoälystä yleisesti

Tekoäly on käsitteenä vuosikymmeniä vanha, 1950-luvun lopulla John McCarthy määritteli tekoälyn tieteenksi ja työksi, jonka tarkoituksena on luoda ”älykkäitä koneita” sekä ”älykkäitä tietokoneohjelmia” (Balmer ym., 2020). Searle (1984) jaottelee tekoälyn karkeasti kahteen kategoriaan, heikkoon ja vahvaan tekoälyyn. Vahva tekoäly on Searlen (1984) mukaan sellainen ohjelma, joka kykenee aidosti itsenäiseen ajatteluun ja päätöksentekoon, kuten ihminen. Heikko tekoäly puolestaan on ohjelma, joka kykenee ainoastaan itsenäisen ajattelun simuloimiseen ja sille opetetun tehtävän suorittamiseen. Ergen (2019) puolestaan määrittelee tekoälyn teknologisen muutoksen aaltona, jonka seurauksena koneet pystyvät suorittamaan kognitiivisia tehtäviä kuten hahmottaminen, looginen päättely sekä oppiminen.

Kreutzer ja Sirrenberg (2019) jakavat tekoälyn käsitteen neljään eri osaan, jotka ovat: tekoäly, neuroverkot, koneoppiminen sekä syväoppiminen. Käsitteiden välinen suhde on seuraava: tekoäly on muiden termien kattokäsite ja se pitää sisällään tekoälyn eri tekniset toteutustavat sisältäen neuroverkot, koneoppimisen sekä syväoppimisen (Sadrehaghighi, 2023). Alla oleva kuvio havainnollistaa tekoälyn käsitteiden välisiä suhteita. Kuvion mukaan neuroverkot on tekoälyn muodostavista käsitteistä ylin, joka pitää sisällään koneoppimisen, jonka osa syväoppiminen on.



Kuvio 1: Tekoälyn käsitteet ja niiden suhde toisiinsa (Mukaillen Kreutzer & Sirrenberg, 2019)

Tekoälyä käsittelevässä tieteellisessä kirjallisuudessa on erilaisia tulkintoja tekoälyn kolmen eri osa-alueen, neuroverkkojen, koneoppimisen ja syväoppimisen välisistä suhteista. Kreuzerin ja Sirrenbergin (2019) kuviosta poiketen useissa artikkeleissa neuroverkot ja syväoppiminen on ryhmitetty samaksi entiteetiksi. Tekoälyn eri käsitteiden välisistä suhteista ei siis ole selvää yleistä konsensusta, ja mm. käsitteiden laajuuden takia erilaisten tulkintojen muodostuminen on lähes väistämätöntä.

Neuroverkot ovat tekoälyn sovellusmuotoja, joiden tarkoituksena on luoda ihmisaivojen rakennetta muistuttavia järjestelmiä. Neuroverkko koostuu tyypillisesti prosessoreista, jotka toimivat rinnakkain eri tasoilla. Neuroverkon ensimmäinen taso on syötetaso, joka vastaanottaa raakaa datan. Syötetason jälkeen seuraa neuroverkon mukaan vaihteleva määrä piilotettuja tasoja, joissa jokainen taso käsittelee vain edellisen tason tulosteen, eikä alun perin vastaanotettua dataa. Neuroverkon viimeinen osa on ulostulotaso, jossa prosessoidaan ja kootaan piilotettujen tasojen signaalit luettavissa olevaksi vastaukseksi. (Kreutzer & Sirrenberg, 2020.) Neuroverkkojen avulla on mahdollista suorittaa paljon erilaisia tehtäviä. Tyypillisimpiä käyttökohteita neuroverkoille ovat kasvojentunnistus, kuvien luokittelu, verkkoturvallisuuden parantaminen sekä luonnollisen kielen prosessointi (engl. natural language processing). (Maurya ym., 2023.)

Nykypäivänä suurin osa uusista tekoälyn soveltamiskeinoista voidaan luokitella koneoppimiseksi. Koneoppimisessa käytetään algoritmeja ja tilastollisia työkaluja lainalaisuuksien löytämiseen valtavista määristä dataa. Lainalaisuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä syötteen ja tulosteen välistä suhdetta. (Ergen, 2019.) Dataa, algoritmeja sekä tilastollisia menetelmiä hyödyntäen koneoppimisella on mahdollista ennustaa tulevia tapahtumia tai tuloksia perustuen suurten datamäärien lainalaisuuksien analysointiin. Koneoppimisen kolme päätoimintamekanismia ovat: aikaisemman datan hyödyntäminen uuden datan luokittelussa, virhefunktion suorittaminen sekä uuden datan luokitteluun vaikuttavien parametrien säätely. Virhefunktion suorittamisella tarkoitetaan koneoppimisalgoritmin ominaisuutta arvioida uuden datan virheellisen luokittelun todennäköisyyttä. Koneoppimista hyödynnetään mm. puheentunnistuksessa, konenäössä ja henkilöautojen autopilotiohjelmistoissa. (Chabot ym., 2023.)

Koneoppimisalgoritmien kouluttamiseen käytetään erilaisia metodeja. Yleisimmät koneoppimisalgoritmin koulutustavat ovat valvottu oppiminen, valvomaton oppiminen, puolivalvottu oppiminen sekä vahvistusoppiminen (engl. reinforcement learning).

Valvottu oppiminen on koneoppimisalgoritmin koulutustapa, johon tarvitaan kolme eri tietoaainesta (engl. dataset), koulutus-, vahvistus- (engl. validation), sekä testustietoaainesta. Valvotussa oppimisessä algoritmin koulutukseen käytettävä data sisältää myös oikeat vastaukset algoritmin tarkoitettuun tehtävään. Esimerkiksi asuntojen hinnoitteluun tarkoitettu koneoppimisalgoritmi voidaan kouluttaa siten, että käytettävä data sisältää asuntojen ominaisuuksien lisäksi niiden hinnat.

Koneoppimisalgoritmin on mahdollista arvioida uusien kohteiden hintoja aikaisemmin analysoitujen kohteiden pohjalta. (Choi ym., 2020.) Valvomaton oppiminen on koneoppimisalgoritmin koulutustapa, jossa koulustietoaainesta ei sisällä vastauksia algoritmin tehtävään.

Valvomattomassa oppimisessä koneoppimisalgoritmin tavoitteena on analysoida dataa vapaasti ja tehdä johtopäätöksiä analysoidun datan pohjalta. Valvomattoman oppimisen avulla on mahdollista selvittää tietoaaineston piileviä yhteyksiä ja rakenteita.

(Burzykowski ym., 2023.) Puolivalvottu oppiminen on eräänlainen kompromissi valvotun ja valvomattoman oppimisen välillä. Puolivalvotussa oppimisessä algoritmi koulutetaan valvotun oppimisen kaltaisesti pienikokoisella tietoaainestolla, joka sisältää vastaukset algoritmin tehtävään. Lyhyen koulutusvaiheen jälkeen puolivalvottu koneoppimisalgoritmi alkaa analysoida dataa vapaasti valvomattoman oppimisen tapaan. (Choi ym., 2020.)

Vahvistusoppiminen (engl. reinforcement learning) puolestaan on hyvin erilainen koneoppimisalgoritmin toteutustapa verrattuna kolmeen edellä mainittuun vaihtoehtoon. Vieira ym. (2020) kertovat, että vahvistusoppimista hyödyntävien algoritmien tavoitteena on oppia käydystä vuorovaikutuksesta ympäristön kanssa. Toinen mainittu vahvistusoppimisalgoritmin ominaisuus on sen kyky säädellä toimintaansa palkintojen ja rangaistusten kautta, eli algoritmi toimii ns. yritys ja erehdys periaatteella. Choi ym. (2020) toteavat, että vahvistusoppiminen on lähimpänä ihmisen oppimista oleva koneoppimisalgoritmi, sillä sen toiminta ei ole täysin riippuvainen aikaisemmin kerätyistä tietoaainestoista.

Syväoppiminen on koneoppimisen alaluokka, jonka fyysinen rakenne muistuttaa neuroverkkojen fyysistä rakennetta. Syväoppivissa konealgoritmeissa signaalit prosessoidaan useammilla piilotetuilla tasoilla, kuin yleisemmissä neuroverkoissa. (Kreutzer & Sirrenberg, 2020.) Syväoppiminen on edistänyt tekoälyn tutkimusta

merkittävästi ja sen avulla monet tekoälyn sovellusmuodot ovat kehittyneet.

Syväoppimista käytetään mm. puheen- ja kuvantunnistuksessa, lääketutkimuksessa sekä aivojen hermoratojen rekonstruktiossa. (LeCun ym., 2015.)

Syväoppivia järjestelmiä on erilaisia, eroja löytyy signaalin prosessointitavassa sekä käyttökohteissa. Esimerkiksi konvoluutioneuroverkot sekä takaisinkytketyvät neuroverkot ovat syväoppivia järjestelmiä. Konvoluutioneuroverkot ovat syväoppivia järjestelmiä, jotka on suunniteltu prosessoimaan kuvia ja muita ruudukon kaltaisella pohjalla esiintyvää dataa. Konvoluutioneuroverkoissa dataa prosessoidaan useiden eri filttareiden avulla, jotka tunnistavat esimerkiksi kuvista yksittäisiä elementtejä. Lopulta eri filttareiden tulokset yhdistetään ja niistä muodostetaan vastaus.

Konvoluutioneuroverkkoja käytetään mm. konenäössä sekä kasvojentunnistuksessa.

Erityisesti konenäön saralla on saavutettu suuria edistysaskeleita

konvoluutioneuroverkkojen avulla. Takaisinkytkettyjä neuroverkkoja käytetään erityisesti puheen ja kielten prosessoinnissa. Takaisinkytkettyyn neuroverkkoon tallentuu kaikki sen prosessoima puhe ja teksti, siten sen on mahdollista päätellä uusien sanojen ja rakenteiden merkityksiä aikaisemmin prosessoidun aineiston pohjalta.

Takaisinkytkettyjen neuroverkkojen käyttökohteita ovat mm. puheentunnistus, konekääntäminen (engl. machine translation) sekä kuvatekstien automaattinen luonti. (LeCun ym., 2015.)

2.2 Mobiiliverkoista yleisesti

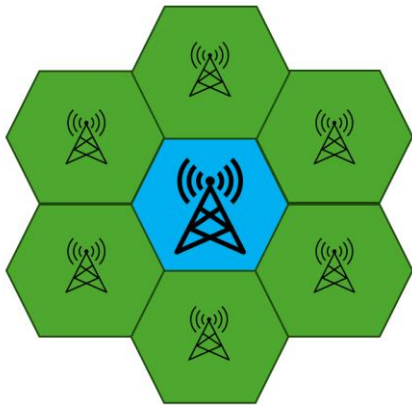
Mobiiliverkkoteknologian ensimmäinen sukupolvi eli 1G mobiiliverkko otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön Japanissa vuonna 1979. 1G mobiiliverkon toiminnassa käytettiin analogisia signaaleja ja sen suurin tiedonsiirtonopeus oli 2,4 kilotavua sekunnissa. Seuraavan sukupolven 2G teknologia otettiin käyttöön ensi kertaa Suomessa vuonna 1991. 2G verkossa signaalit liikkuvat digitaalisesti, joka mahdollisti osaltaan kaistanleveyden kasvun, 2G verkon suurin tiedonsiirtonopeus oli 64 kilotavua sekunnissa. 3G eli kolmannen sukupolven mobiiliverkot otettiin ensimmäisen kerran käyttöön vuonna 2001. 3G teknologian avulla saatiin lähetettyä aiempaa suurempi määrä dataa halvemmalla hinnalla, 3G mobiiliverkkojen tiedonsiirtonopeus oli alkuun 144 kilotavua sekunnissa, mutta teknologian kehittyessä saavutettiin kahden megatavun yhteysnopeuksia. Seuraava askel 4G mobiiliverkkoihin tapahtui vuonna 2009 ja sen yhteysnopeudet olivat alkuun 100 megatavua sekunnissa, 2010-luvulla yhteysnopeudet

nousivat jopa yhden gigatavuun sekunnissa. Viides mobiiliverkkojen sukupolvi, 5G otettiin ensimmäisen kerran käyttöön Etelä-Koreassa vuonna 2019. 5G teknologian avulla voidaan saavuttaa jopa 10:n gigatavun sekuntinopeuksia käyttäjälaitteesta verkkoon suuntautuvassa liikenteessä (engl. Uplink) ja jopa 20:n gigatavun sekuntinopeuksia verkosta käyttäjälaitteeseen suuntautuvassa liikenteessä (engl. Downlink). 5G teknologian myötä mobiiliverkkoihin on yhdistettyinä miljardeja laitteita. (Hodara & Skaljo, 2021; Vikranth ym., 2020.)

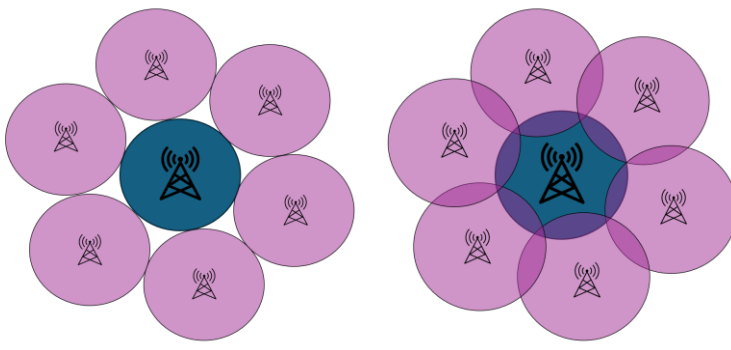
Viidennen sukupolven mobiiliverkot on suunniteltu tarjoamaan erittäin suuria yhteysnopeuksia, yhä laajemman alueen kattavia internetyhteyksiä sekä erittäin alhaisia viiveitä (Han ym., 2017). 5G verkon käyttöönoton mahdollisti muutamien ratkaisevien teknologioiden kehittäminen. Yksi 5G:n mahdollistaneista innovaatioista on parannettu mobiililaajakaista, eMBB (enhanced Mobile BroadBand), jonka avulla verkkojen yhteysnopeudet ovat kasvaneet yli 10 gigatavuun sekunnissa. Toinen 5G:n mahdollistaneista keskeisistä innovaatioista on URLLC-teknologia (Ultra-Reliable Low-Latency Communication), jonka avulla tietoliikenneyhteyksien luotettavuus kasvoi merkittävästi ja viive laski jopa alle yhteen millisekuntiin. Kolmas 5G:n mahdollistavista teknologioista on mMTC (massive Machine-Type Communications), joka mahdollistaa esineiden, kuten esimerkiksi sensoreiden, kodinkoneiden sekä teollisuuden laitteiden yhdistämisen internettiin. mMTC-teknologia on äärimmäisen tärkeä IoT:n (Internet of Things) eli esineiden internetin kannalta. Neljäs 5G:n kannalta tärkeä teknologinen kehitysaskel on korkeampien taajuusalueiden hyödyntäminen, eli mmWave teknologia. (Javid & Khara, 2022.)

MmWave teknologiassa hyödynnetään korkeampia lähetystaajuuksia, 30 ja 300 gigahertsin välillä, mobiiliverkkojen aikaisempien sukupolvien lähetystaajuudet ovat olleet enintään 6 gigahertsia. Korkeampien lähetystaajuuksien käyttö mahdollistaa huomattavasti suuremman kaistanleveyden ja korkeamman tiedonsiirtonopeuden, 30–300 gigahertsin lähetystaajuuksilla signaalin aallonpituus on 1–10 millimetriä. Lyhyempi aallonpituus mahdollistaa pienempien antennien käytön, joka puolestaan parantaa yhteyksien laatua. mmWave teknologian kääntöpuolena on signaalin verrannollisesti lyhyt kantama, tyypillisesti satoja metrejä. Lyhyemmän kantaman vuoksi 5G verkon tukiasemien solut ovat pienempiä kuin aikaisemmissa mobiiliverkkosukupolvissa. Mobiiliverkon soluilla tarkoitetaan yhden tukiaseman kantoaluetta. Mobiiliverkon solut ovat kuusikulmion muotoisia. Kuusikulmioita

käyttämällä kantoalueet eivät mene lomittain, eikä mobiiliverkkoon jää aukkoja, toisin kuin ympyränmuotoisia soluja käytettäessä. (Hodara & Skaljo, 2021.) Hodara ja Skaljo (2021) havainnollistavat artikkelissaan mobiiliverkon kuusikulmaisten solujen tehokkuutta ympyränmuotoisiin soluihin verrattuna, Alla olevissa kuvioissa 2 ja 3 havainnollistetaan solutyypin eroa.



Kuvio 2: Kuusikulmion muotoisten solujen tehokkuus (Mukaillen Hodara & Skaljo, 2021)



Kuvio 3: Ympyränmuotoisten solujen tehokkuustappio (Mukaillen Hodara & Skaljo, 2021)

Kuvioita vertailemalla voi huomata, että ympyränmuotoisia soluja käytettäessä verkon kantoalueelle jää joko aukkoja, tai useamman tukiaseman kantamat menevät päällekkäin, molemmat skenaariot johtavat tehokkuustappioon. Kuusikulmion muotoisia soluja käytettäessä solujen välille ei jää aukkoja, eivätkä solujen kantamat mene päällekkäin.

Mobiiliverkon solurakenne mahdollistaa samojen lähetystaajuuksien käytön saman ylemmän tukiaseman soluissa, jotka eivät ole vierekkäin. Välissä oleva eri taajuutta käyttävä tukiasema estää häiriöiden esiintymisen. Saman lähetystaajuuden käyttäminen

useassa saman alueen solussa lisää koko järjestelmän kapasiteettia merkittävästi. Mobiiliverkon solut muodostavat soluryhmiä, jotka ovat osa ylemmän tason soluryhmää. Jokainen soluryhmätaso lisää järjestelmän kapasiteettia, sillä samoja lähetystaajuuksia voidaan käyttää uudelleen useampaan kertaan. (Hodara & Skaljo, 2021.)

5G:n käyttöönoton myötä mobiiliverkkojen toiminnassa on alettu käyttää edellä mainittujen teknologioiden lisäksi mm. verkon viipalointia (engl. Network Slicing), reunalaskentaa (engl. Edge Computing), ohjelmistolla hallintoituja verkkoja sekä MIMO-antennitekniikkaa (engl. Multiple-Input Multiple-Output) (Han ym., 2017). Verkon viipaloinnilla tarkoitetaan verkon jakamista erillisiin virtuaalisiin mobiiliverkkoihin eri käyttäjäryhmille. Mobiiliverkon viipaloinnin avulla esimerkiksi turvallisuuden kannalta olennaiset mobiiliverkkoja hyödyntävät laitteet kuten terveydenhuollon laitteet, itseajavat autot sekä infrastruktuurin valvontalaitteisto voidaan erottaa muusta tietoliikenteestä. Myös mm. teollisuudesta, älykodeista ja erilaisista sensoreista koostuva esineiden internetin tuottama verkkoliikenne sekä tavallisten mobiililaitteiden käyttäjät voidaan jakaa omiin virtuaalisiin verkkoihinsa. (Hodara & Skaljo, 2021.)

Ohjelmistolla hallinnoitu verkko (engl. Software-Defined Networking) on 5G:ssä käytettävä teknologia, jossa verkon reitittimien laiteohjelmistot korvataan yhteisellä ohjelmistolla, jonka avulla kaikkia reitittimiä voidaan hallita samanaikaisesti. Reitittimien hallintaan tarkoitettu ohjelmisto koostuu hallinta- ja datakerroksesta (engl. Control plane & Data plane). Hallintakerros koostuu signaaleista, jotka määrittelevät miten datapakettien lähetys tapahtuu. Datakerroksessa tapahtuu tiedon varsinainen liikkuminen hallintakerroksen määrittelemän protokollan mukaisesti. Verkon viipaloinnin ja ohjelmistolla hallinnoitun verkon tuomia muutoksia ovat mm. verkon tehokkaampi skaalautuminen, pienempi energiankulutus ja pienentynyt laskennallinen redundanssi. (Hodara & Skaljo, 2021.)

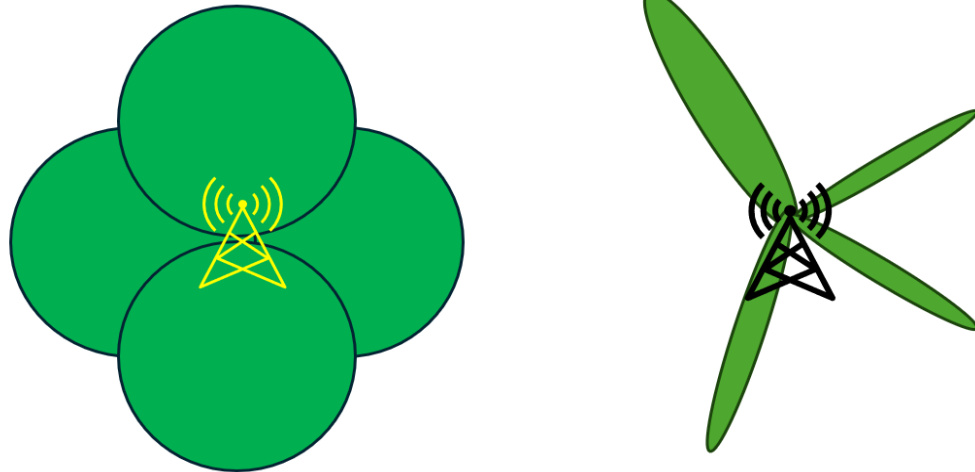
Reunalaskenta on 5G verkkojen tekninen ominaisuus, jonka avulla pilvipalvelut, kuten tallennus, laskenta ja datan prosessointi tuodaan lähemmäksi mobiiliverkon käyttäjiä. Mobiiliverkon laskentatehon tuominen lähemmäksi käyttäjiä alentaa verkon latenssia. Muita reunalaskennan tuomia hyötyjä ovat mm. alhaisemmat verkon

käyttökustannukset, palvelun parantunut laatu ja parempi energiatehokkuus. (Hassan ym., 2019.)

MIMO (multiple-input multiple-output) antennitekniologia on 5G mobiiliverkkojen mukana kehittynyt teknologia, jossa signaalin vastaanottamiseen ja lähettämiseen käytetään useita antennia. Ensimmäistä kertaa MIMO-tekniikkaa käytettiin mobiiliverkon toiminnassa vuonna 2008. MIMO-tekniikan ensimmäisessä versiossa käytettiin 2x2 antennikonfiguraatiota, eli vastaanottamiseen sekä lähettämiseen käytettiin kahta antennia. 4G verkoissa MIMO-tekniikan käyttö yleistyi 4x4 antennikonfiguraatiolla, 5G:n myötä antennien määrä on kasvanut merkittävästi. MIMO-antennitekniologiassa käyttäjälaitteen tai tukiaseman antennit vastaanottavat hieman eri versioita samasta signaalista ja kaikki versiot voidaan yhdistää matemaattisesti, jolloin yhteyden laatu paranee. MIMO-antennia käyttävän laitteen lähettämä data puretaan useampiin pienempiin uniikkeihin datapaketteihin, joka lisää järjestelmän kapasiteettia. Lisääntyneen kapasiteetin takia yksi tukiaseman antenni voi palvella montaa käyttäjää samanaikaisesti. (Shahen Shah, 2022.)

Keilanmuodostus (engl. Beamforming) on MIMO-antennitekniologian mahdollistama signaalin lähetystapa 5G mobiiliverkossa. Perinteisesti mobiiliverkon tukiaseman ovat säteilleet lähettämänsä signaalia tasaisesti ympyrän muotoisille alueille.

Keilanmuodostuksessa hyödynnetään MIMO-antenneja, joiden avulla tukiaseman signaalit voidaan kohdistaa tarkemmin keilanmuotoiselle alueelle. Signaalien keskittäminen vähentää signaalihäiriöiden määrää. (Shahen Shah, 2022.) Alla olevat kuviot havainnollistavat keilanmuodostuksen ja tavallisen signaalinlähetyksen välisiä eroja.



Kuva 4: Perinteisen signaalin lähetystavan (vas.) ja keilanmuodostuksen välinen ero havainnollistettuna (Mukaillen Shahen Shah, 2022)

Vasemmanpuoleinen kuvio esittää perinteistä tukiasemaa, joka säteilee signaaleita tasaisesti ympyränmuotoiselle alueelle. Oikeanpuoleinen kuvio havainnollistaa keilanmuodostusta, jossa tukiaseman lähettämät signaalit kootaan keilanmuotoiselle alueelle, joka parantaa signaalia ja tehostaa resurssien käyttöä.

Massadatan analytiikka (engl. Big Data Analytics) on myös erittäin keskeisessä roolissa 5G mobiiliverkon toiminnan optimoinnin kannalta. Dataa kerätään käyttäjälaitteista, tukiasemista sekä verkon muista komponenteista. Suuria datamääriä keräämällä operaattoreiden on mahdollista saada tietoa käyttäjien käyttäytymisestä, verkon suorituskyvystä sekä mahdollisista huoltotarpeista. (Han ym., 2017.) Keräämällä dataa kaikista mobiiliverkon osista operaattoreiden on mahdollista parantaa käyttäjäkokemusta, tehostaa verkon resurssienkäyttöä sekä parantaa verkon suorituskykyä (Jha ym., 2021.)

Mobiiliverkot ovat aiheena erittäin laaja, ja tämän tutkielman katsaus mobiiliverkkoihin antaa lukijalle yleiskatsauksen mobiiliverkkoteknologiasta ja 5G verkoissa käytetyistä teknologioista. Katsaus ei ole täysin kattava, vaan pikemminkin pintaraapaisu mobiiliverkkojen laajaan rakenteeseen ja toimintoihin.

Mobiiliverkkojen uudet sukupolvet ovat ilmestyneet noin 10 vuoden välein eli ajallisesti mobiiliverkkoteknologian kehitys on melko lineaarista, kuudennen sukupolven mobiiliverkot tulevat siis mitä todennäköisimmin käyttöön vuoden 2030 tienoilla. Yhteysnopeuksien ja verkon teknisten ominaisuuksien osalta mobiiliverkkoteknologian kehitys ei ole ollut lineaarista. 1G mobiiliverkkoihin verrattuna 5G verkon

yhteysnopeudet ovat yli 8 miljoonaa kertaa nopeammat. Suurin muutos yhteysnopeuksissa tapahtui 2G ja 3G teknologian välillä, 3G verkon suurin yhteysnopeus oli 500 kertaa nopeampi kuin 2G verkossa. Mobiiliverkoissa liikkuva data on siis myös moninkertaistunut, jonka seurauksena mobiiliverkosta kerättävän datan analysointi on yhä työläämpää, mutta sitäkin tärkeämpää. 5G teknologia tarjoaa sen käyttäjille ennennäkemätöntä suorituskykyä sekä joustavuutta. 5G teknologia on myös mahdollistanut uusia mobiiliverkkoteknologian käyttökohteita, kuten esimerkiksi tuotantolaitoksen toiminnan reaaliaikainen seuranta ja hallinnointi. 5G-teknologian myötä mobiiliverkkojen merkitys yhteiskunnan toimivuuden kannalta on kasvanut ja 6G:n ilmestymisen myötä mobiiliverkkojen merkitys tulee lähes varmasti kasvamaan entisestään.

2.3 Tekoälyn merkitys mobiiliverkkojen toiminnalle

Tekoälyn hyödyntäminen mobiiliverkon toiminnassa ei ole uusi ilmiö, sillä alan ensimmäiset tekoälyn sovellustavat ilmestyivät jo 1980-luvun lopussa. Ensimmäiset tekoälyn käyttökohteet olivat suurelta osin asiantuntijajärjestelmiä (engl. expert systems) joita käytettiin monimutkaisten järjestelmien diagnostiikan apuvälineinä. Asiantuntijajärjestelmällä tarkoitetaan tietokoneohjelmaa, joka emuloi ihmisen ongelmanratkaisukykyä hyödyntäen tietoaaineistoa sekä päättelymoottoria (engl. inference engine). (Qi ym., 2007.)

Ennen 5G teknologian ilmestymistä, mobiiliverkkoja hyödyttävän tekoälyn sovelluskohteita olivat mm. resurssien allokointi, liikennemäärien ennakointi sekä poikkeavuuksien tunnistaminen. Kyseisten sovellusmuotojen ongelmaksi koitui niiden kyvyttömyys pysyä mobiiliverkkojen skaalautuvuuden perässä. Verkkojen suurentunut koko ja monimutkaisempi rakenne moninkertaistivat tietoliikenteen määrän, jonka analysointiin silloiset koneoppimisalgoritmit eivät olleet enää tehokkaita. (Chen ym., 2019.)

Tekoälyn rooli nykypäivän mobiiliverkkoteknologiassa on Li ym. (2017) mukaan äärimmäisen keskeinen. Kysyntä yhä nopeampia, luotettavampia ja tehokkaampia mobiiliverkkoja varten kasvaa jatkuvasti, tekoälyn tarjoamista työkaluista on tulossa yhä tärkeämpiä mobiiliverkon optimoinnin ja käyttäjäkokemuksen parantamisen kannalta. (Li ym., 2017.) Tekoälyn hyödyntäminen on vaikuttanut suuresti mobiiliverkkojen fyysisen tason toimintoihin. Verkon fyysisellä tasolla hyödynnetään

mm. syväoppimisalgoritmeja, joiden avulla voidaan vähentää signaalihäiriöiden määrää sekä tehostaa verkon resurssien käyttöä. Syväoppimisalgoritmeja hyödynnetään myös mobiiliverkon siirtoyhteystasolla (engl. data link layer), jossa sitä käytetään esimerkiksi resurssienhallintaan sekä yhteyden laadun arviointiin. Verkkotasolla (engl. network layer) syväoppivia algoritmeja hyödynnetään mm. reitittämisen optimoinnin ja kuormituksen tasapainotuksen apuna. Ylemmillä tasoilla, kuten sovellustasolla (engl. application layer), syväoppimista käytetään mm. datan pakkaamisen tehostamiseen (Mao ym., 2018.) Datan tehokas ja luotettava välitys mobiiliverkossa on erityisen keskeinen tekoälysovellusten tuoma hyöty 5G teknologian kannalta, sillä 5G verkko kattaa valtavan määrän erilaisia yhdistettyjä laitteita, joilla on vaihtelevat vaatimukset kaistanleveyden, signaalin luotettavuuden sekä latenssin osalta (Li ym., 2017).

Tekoäly on keskeisessä roolissa myös verkkoturvallisuuden parantamisessa. Perinteiset tietoturvatimet eivät ole riittäviä nykyaikaisia kyberhyökkäyksiä vastaan.

Tekoälypohjaisten turvajärjestelmien avulla voidaan tehostaa mm. tunkeutumisyritysten estämistä ja verkon poikkeavuuksien havaitsemista reaaliaikaisesti. (Mao ym., 2018.)

Tekoälyä voidaan siis hyödyntää monipuolisesti 5G mobiiliverkkoteknologian tukena, ja tekoälyn sovellusten rooli mobiiliverkkojen toiminnan kannalta kasvaa jatkuvasti. 5- ja 6G teknologioiden myötä mobiiliverkkojen kuljettaman tiedon määrä on moninkertaistunut. Datan määrä on yksinkertaisesti liian suuri, jotta ihmisiä olisi kannattavaa käyttää sen analysointiin. Tekoälyn hyödyntäminen on siis jopa ratkaiseva asia nykypäivän mobiiliverkkomarkkinoilla, sillä tekoälyn tehokas hyödyntäminen mahdollistaa laadun parantamisen samanaikaisesti kustannusten vähentämisen kanssa. Seuraavassa luvussa käsitellään 5G mobiiliverkon tekoälysovellusten toimintaa tarkemmin.

3 Tekoälyn hyödyntäminen 5G-mobiiliverkoissa

3.1 Käyttäjäkokemuksen ja toiminnan optimointi

Mobiiliverkkoteknologian kehityksen myötä verkon kautta kulkevan tietoliikenteen määrä ja siihen yhdistettyjen laitteiden lukumäärä kasvaa jatkuvasti. Lisääntynyt verkkoliikenne ja kasvanut käyttäjäkunta ovat vaikeuttaneet korkeatasoisen palvelunlaadun ja käyttäjäkokemuksen tuottamista verkon käyttäjille. Mobiiliverkkojen käyttäjät odottavat verkolta jatkuvaa internetyhteyttä, suuria tiedonsiirtonopeuksia, alhaista viivettä ja luotettavaa verkkoyhteyttä käyttäjän sijainnista riippumatta. Nykyaikaisten mobiiliverkkojen monimutkainen ja dynaaminen rakenne tekevät näiden odotusten jatkuvasta täyttämisestä haastavaa. Tekoälyn hyödyntämisen myötä käyttäjäkokemuksen parantamiseen voidaan käyttää menetelmiä, jotka olisivat mahdottomia perinteisillä järjestelmillä. (Luo ym., 2022.)

Tekoälyä hyödyntävässä mobiiliverkkoarkkitehtuurissa kerätään valtavia määriä dataa verkon eri komponenteista, kuten käyttäjälaitteista, radioliityntäverkosta sekä ydinverkosta. Tekoälyalgoritmien avulla valtavien datamäärien tehokas analysointi on mahdollista, ja analysoinnin kautta mobiiliverkon operaattorit saavat tärkeää tietoa verkon tilasta, kuluttajakäytöksestä sekä radiosignaalien etenemisestä tukiaseman ja käyttäjälaitteen välillä. Tekoälyn prosessoiman tiedon pohjalta on mahdollista tehdä hyvin informoituja päätöksiä esimerkiksi resurssien allokointiin tai verkon rakenteen suunnitteluun liittyvissä kysymyksissä. (Luo ym., 2022.)

3.1.1 Signaalin reititys ja verkon energiatehokkuus

Mobiiliverkkojen kuljettaman tietomäärän kasvu ja saumattomasti yhteyden säilyttävien mobiiliverkkojen kasvanut kysyntä ovat edellyttäneet mobiiliverkkojen operaattoreita kehittämään tehokkaampia ja joustavampia signaalien reititysmetodeja (Jiang ym., 2022; Senthilvel ym., 2023). Jiang ym. (2022) esittävät artikkelissaan, että perinteiset signaalin reititystavat eivät ole riittäviä optimoimaan signaalin reititystä 5G-mobiiliverkoissa. Tekoälyn integrointi osaksi reititysalgoritmeja on lupaava lähestymistapa mobiiliverkon reitityksen optimointiin (Senthilvel ym., 2023).

5G-teknologian myötä mobiiliverkon energiankulutus on lähtenyt nousuun kaistanleveyden ja yhteysnopeuksien mukana. Jiang ym. (2022) käsittelevät

artikkelissaan mobiiliverkon signaalien reitityksessä hyödynnettäviä algoritmeja, joiden avulla voidaan vähentää verkon energiankulutusta ja tehostaa signaalien reitittämistä. Tutkimuksessa verrataan aikaisemmin kehitettyjä GreenOSPF ja MaxCompatibility reititysalgoritmeja Jiang ym.:n kehittelemään tekoälyä hyödyntävään reititysalgoritmiin.

Tutkimuksessa tekoälyä hyödyntävässä algoritmista käytettiin takaisinkytkettyä neuroverkkoa muistuttavaa järjestelmää, algoritmin avulla voitiin dynaamisesti muuttaa kunkin yhteyspisteen painoarvoa. Yhteyspisteen painoarvon muuttaminen tapahtui yhteyspisteen käyttöasteen ja energiankulutuksen perusteella. Painoarvoja säätelemällä tutkimuksessa käytetyn tekoälyalgoritmin avustuksella signaalien reititys voitiin tehdä dynaamisesti siten, että yhteyspisteen käyttöaste maksimoitiin samalla kun energiankulutus minimoitiin. (Jiang ym., 2022.)

Tutkimuksessa käytettiin simulaatioalustaa algoritmien testaamiseen verkkoympäristössä. Tuloksena tekoälyä hyödyntävä EEIR-reititysalgoritmi suoriutui kahta muuta algoritmia paremmin usealla osa-alueella. EEIR-algoritmi ei simulaatiossa sammuttanut yhtäkään yhteyspistettä kahdesta muusta algoritmista poiketen, vaan se piti kaikki käyttämättömät yhteyspisteet lepotilassa. EEIR-algoritmi käytti samanaikaisesti myös pienempää määrää tarjolla olevista yhteyspisteistä, joka johti pienempään energiankulutukseen ja yhteyspisteiden suurempaan käyttöasteeseen. Lisäksi EEIR-algoritmin hallinnoimassa verkossa yhteydenmuodostuspyyntöjen hylkäämistä ei esiintynyt kahdesta muusta poiketen lainkaan. Yhteydenmuodostuspyynnön hylkääminen tapahtuu, kun yhteyspisteen kaistanleveys ei riitä pyynnön toteuttamiseen ja verkko hylkää pyynnön. Kokonaisuudessaan EEIR-algoritmin suurin ero kahteen muuhun algoritmiin näkyi, kun yhteydenmuodostuspyyntöjen määrä oli alhainen. Pyyntöjen määrän noustessa, EEIR-algoritmin tehokkuus laski, mutta se oli silti tehokkaampi kuin verrokkialgoritmit. (Jiang ym., 2022.)

3.1.2 Verkon viipalointi

Verkon viipalointi on 5G verkon tekninen ominaisuus, jonka avulla mobiiliverkko voidaan jakaa erillisiin virtuaalisiin mobiiliverkkoihin eri käyttäjäryhmille. Verkon viipaloinnissa voidaan hyödyntää koneoppimisalgoritmia ennakoimaan, milloin tietty virtuaalinen verkkoviipale tarvitsee enemmän laskentaresursseja palvelun laadun säilyttämiseksi. Viipalointiin käytetty koneoppimisalgoritmi tekee päätöksensä mm. prosessoreiden käyttöasteesta ja verkon liikennemäärästä riippuen. Camargo ym. (2023)

käsittelevät artikkelissaan tutkimusta, jossa verkon viipaloinnin dynaamisen uudelleenkonfiguroinnin apuna käytettiin koneoppimisalgoritmia.

Koneoppimisalgoritmi integroitiin osaksi tutkimuksen alaisen mobiiliverkon hallintajärjestelmää. Algoritmia käytettiin ennusteiden tekemiseen ja varsinaisen resurssien allokointi tapahtui hallintajärjestelmän kautta. (Camargo ym., 2023.)

Tutkimuksen tuloksena koneoppimisalgoritmi saavutti 91 % tarkkuuden lisälaskentatehoa tarvitsevien verkkoviipaleiden tunnistamisessa.

Koneoppimisalgoritmin antamien ennusteiden perusteella verkon viipalointi voidaan proaktiivisesti uudelleenkonfiguroida eli allokoida lisäresursseja niitä tarvitsevalle verkkoviipaleelle ennakoitun kysynnän perusteella. Proaktiivisella verkkoviipaleiden uudelleenkonfiguroinnilla on mahdollista samanaikaisesti optimoida palvelun laatu sekä verkon resurssien käyttö. (Camargo ym., 2023.)

3.1.3 Verkkoliikenteen ennakointi ja verkon kuormituksen tasapainotus

Mobiiliverkkojen nopea kehitys on johtanut verkkoliikenteen määrän huomattavaan kasvuun. Verkkoliikenteen ennakointi antaa verkon operaattoreille mahdollisuuden säädellä verkon toimintaa proaktiivisesti ennakoitujen verkkoliikennemäärien pohjalta, jolloin resurssien käytön tehokkuus kasvaa ja käyttäjäkokemus parantuu.

Verkkoliikenteen ennakointi on runsaan määrän resursseja vaativa prosessi. Osittain tästä syystä verkkoliikenteen ennakoinnissa on alettu hyödyntää mm.

koneoppimisalgoritmeja sekä syväoppivia järjestelmiä. (Selvamanju & Shalini, 2021.)

Zhang ym. (2018) esittelevät konvoluutioneuroverkkoja hyödyntävän

kaupunginlaajuisen verkkoliikenteen ennakointiin tarkoitettua järjestelmää. Järjestelmä

muuntaa sisään- ja ulosmenevän verkkoliikenteen kuviksi. Kuviksi muunnetun ja

analysoidun verkkoliikenteen pohjalta voidaan havaita syy-seuraussuhteita

verkkoliikenteen määrässä. Kokeellisten tulosten perusteella

konvoluutioneuroverkkojärjestelmä suoriutui verkkoliikenteen ennakoinnista vertailussa

olleita perinteisempiä algoritmeja paremmin. Järjestelmän ennusteet olivat lähellä

mitattuja reaaliarvoja, ja ennusteet olivat melko tarkkoja myös aikoina, jolloin

verkkoliikenteen määrä vaihteli nopeasti. (Zhang ym., 2018.)

Hongvanthong (2020) käsittelee tutkimuksessaan tekoälyllä paranneltua verkon

kuormituksen tasapainotusta. Tutkimuksessa esitelty tasapainotusjärjestelmä jakaa

verkon neljään osaan: käyttäjälaitteisiin, verkkoliikenteen prosessointikerrokseen, kuormituksen jakokerrokseen sekä hallintakerrokseen. Verkkoliikenteen prosessointikerroksessa käyttäjälaitteista vastaanotettu data luokitellaan erittäin tärkeä, tärkeä ja ei erityisen tärkeä kategorioihin, jotta kiireellinen liikenne saadaan erotettua ei-kiireellisestä. Kuormituksen jakokerroksessa kaksi tekoälyalgoritmeilla toimivaa kuormituksen tasaamiseen tarkoitettua ohjelmistoa valvovat hallintakerroksen osien käyttöastetta, ja siirtelevät tehtäviä vähemmän käytetyille osille. Järjestelmä hyödyntää myös vahvistusoppimista, eli sen toiminta kehittyy aikaisempien tulosten ja saadun palautteen perusteella. Neliosainen tekoäly hyödyntävä kuormituksen jakojärjestelmä tuotti erittäin lupaavia tuloksia simulaatioympäristössä. Tekoälyjärjestelmä välitti onnistuneesti 95 % lähetetyistä paketeista, verrokijärjestelmät 62 % ja 65 %. Tekoälyjärjestelmän avulla myös kuormituksen siirrosta järjestelmän sisällä johtuva viive saatiin putoamaan noin 80 millisekunnista 15 millisekuntiin. (Hongvanthong, 2020.)

3.1.4 Tukiaseman vaihto

5G verkon standardisoidun tukiaseman vaihtoprotokollan aikana tukiasema, jonka kantoalueelta käyttäjä on siirtymässä pois, katkaisee yhteyden käyttäjän laitteeseen ennen kuin yhteys uuden tukiaseman kanssa on ehtinyt täysin muodostua. Signaali käyttäjälaitteen ja tukiaseman välillä siis katkeaa hetkellisesti, joka johtaa latenssin kasvuun ja pakettihävikin (engl. packet loss) määrän nousuun. (da Silva Brilhante ym., 2024.)

5G mobiiliverkkoteknologiassa käytetään aikaisempaa korkeampia lähetystaajuuksia, jotka toisaalta lisäävät verkon kapasiteettia, mutta toisaalta pienentävät yhden tukiaseman kantoalueen kokoa. Tämä tarkoittaa, että 5G-verkossa tapahtuu tukiaseman vaihdoksia enemmän aikaisempiin mobiiliverkkosukupolviin verrattuna. (Ashour & Fouda, 2023.)

Park ym. (2024) esittävät, että 5G verkon tukiaseman vaihdoksen optimoinnin apuvälineenä voidaan käyttää koneoppimisalgoritmeja. Koneoppimisalgoritmin analysoiman käyttäjälaitteesta saadun datan pohjalta voidaan määritellä ennalta optimaalinen ajankohta ja solu tukiaseman vaihdoksen tehostamista varten. Koneoppimisen käyttämistä tukiaseman vaihdokseen on tutkittu simulaatioissa.

Simulaatioiden perusteella koneoppimisalgoritmin avulla suoritettu tukiaseman vaihdos vähentää tukiaseman vaihdoksen epäonnistumiset lähes nollaan. (Park ym., 2024.)

3.1.5 MIMO-tekniikka

Mobiiliverkkoteknologian kehityksen myötä myös antennitekniikka on kehittynyt runsaasti. Ennen MIMO-tekniikan käyttöönottoa, signaalin lähetykseen ja vastaanottoon oli molempiin yksi antenni, joka rajoitti järjestelmän kapasiteettia. MIMO-tekniikan käyttöönoton myötä antennien määrä lisääntyi ja järjestelmän kapasiteetti kasvoi. (Yadav ym., 2022.) 5G mobiiliverkkojen myötä tietoliikenteen määrä on kasvanut äkillisesti, ja perinteisten MIMO-järjestelmien avulla palvelun laadun ylläpito on siksi yhä haastavampaa. Tekoäly on yksi työkalu MIMO-järjestelmien toiminnan optimointiin, mm. kone- ja syväoppimisalgoritmien avulla useiden antennien tuottaman datan prosessointia voidaan helpottaa. (Xin ym., 2023.)

Chary ym. (2024) esittelevät tutkimuksessaan käyttäjälaitteen ja tukiaseman MIMO-antennien välisten kanavien (engl. Channel) laadun arviointiprosessia tehostavan prosessin, jossa hyödynnetään mm. koneoppimisalgoritmeja. Prosessin tavoitteena on valita optimaalisimmat tukiaseman ja käyttäjän eri antennien välille muodostuvista kanavista. Prosessissa otetaan huomioon useita eri tekijöitä, esimerkiksi signaalin tulokulma, josta voi approksimoida käyttäjälaitteen sijainnin. Muita tekijöitä olivat mm. signaalin lähetyskulma, viive sekä signaalin voimakkuuden heikentyminen. Näiden tekijöiden pohjalta, algoritmi valitsee optimaalisimmat kanavat yhteyden muodostamista varten. Kanavien valinnan jälkeen algoritmi analysoi käyttäjälaitteista vastaanotettua dataa, joka kertoo mm. vastaanotetun signaalin voimakkuuden ja SNR-arvon (engl. Signal to Noise Ratio), joka kuvaa signaalihäiriöiden osuutta lähetetystä tietoliikenteestä. Edellä mainittujen arvojen avulla optimaalisten kanavien valintaprosessia voidaan tehostaa. (Kanaka Chary ym., 2024.)

Simuloidussa ympäristössä suoritettussa kokeessa algoritmi päihitti verrokkialgoritmit jokaisella mitatulla osa-alueella. Mitattuja osa-alueita ovat yhteysvirheiden määrä, signaalin prosessointiin käytetty aika, lähetystaajuusspektrin käyttötehokkuus (engl. Spectral Efficiency) sekä bittivirhesuhde (engl. Bit Efficiency Ratio). (Kanaka Chary ym., 2024.) Tekoälyn avulla on siis mahdollista tehostaa MIMO-antennien välistä tietoliikennettä merkittävästi. Parantunut antennien välinen kommunikaatio

mahdollistaa laadukkaammat kommunikaatioyhteydet, joka parantaa käyttäjäkokemusta.

3.1.6 Verkon turvallisuus ja ylläpito

Mobiiliverkkojen kehityksen ja niiden käyttäjien kasvumäärän myötä myös verkon kohtaamat tietoturvaohauhat ovat kehittyneet. Perinteiset mobiiliverkon suojausmenetit eivät ole enää tehokkaita verkkoon tunkeutumisen tai haittaohjelmien tunnistamisessa. Tekoälyteknologian kehityksen myötä verkkohyökkäyksien tunnistukseen käytettävät tekoälypohjaiset järjestelmät ovat kehittyneet. Tekoälypohjaiset järjestelmät tarjoavat perinteisiin järjestelmiin verrattuna huomattavasti alhaisemman väärrien hälytysten määrän sekä paremman suorituskyvyn verkkohyökkäyksien tunnistamiseen. (Islam ym., 2023.)

Yksi tekoälyn käyttötavoista 5G mobiiliverkon suojaamiseen on hajautettujen palvelunestohyökkäysten (engl. Distributed Denial of Service) tunnistamisen tehostaminen. Koneoppimisjärjestelmät ovat saavuttaneet lupaavia tuloksia hajautettujen palvelunestohyökkäysten tunnistamisessa, Ko ym. (2023) vertailevat hyökkäysten tunnistamiseen tarkoitettuja koneoppimisalgoritmeja hyödyntäviä järjestelmiä, ja parhaiten suoriutunut järjestelmä saavutti yli 99 %:n tarkkuuden hajautettujen palvelunestohyökkäysten onnistuneessa tunnistamisessa ja niiden haittavaikutusten lieventämisessä. (Ko ym., 2023.)

Lee ym. (2022) esittelevät tutkimuksessaan verkon tunkeutumisyritysten estoon suunnitellun tekoälyä hyödyntävän järjestelmän. Järjestelmä koulutetaan valvotun oppimisen avulla, koulutusmateriaalina käytetään aikaisempien tunkeutumisten tietoja. Tietoja analysoidaan erilaisten syväoppimismallien kuten mm. konvoluutioneuroverkkojen avulla. Järjestelmän toimintaa on testattu 5G mobiiliverkkoa hyödyntävässä pienoistehtaassa, joka sisältää useita erilaisia verkkoon liitettyjä laitteita. Tekoälyä hyödyntävä järjestelmä tunnistoi simuloidun verkkohyökkäyksen ja pyysi verkon hallinnointijärjestelmää katkaisemaan haitallisen laitteen yhteyden verkkoon. (Lee ym., 2022.)

Ahammadi ym. (2022) esittelevät julkaisussaan signaalin lähetystarkkuutta parantavan tekoälyä hyödyntävän järjestelmän, joka mm. parantaa verkon turvallisuutta. Esitelty järjestelmä käyttää älykkäitä signaalin heijastuspintoja (engl. Intelligent Reflecting

Surfaces), jotka muuttavat asentoansa dynaamisesti reagoiden lähiverkon muuttuviin olosuhteisiin. Asennon muutoksella voidaan manipuloida signaalin kulkureittiä vastaanottimeen. Jatkuvalla signaalin kulkureitin optimoinnilla on mahdollista parantaa mobiiliverkon kommunikaatioyhteyksien yksityisyyttä merkittävästi, sillä tarkemmin kohdistettuja signaaleita on vaikeampi siepata. (Ahammadi ym., 2022.)

Mobiiliverkkojen rakenteen laajentuessa ja monimutkaistuessa teknologian kehityksen mukana on tehnyt verkkojen toimintojen ylläpidon ja huollon hallinnoinnista yhä haastavampaa. Perinteisesti mobiiliverkkojen toimintojen ylläpito ja huolto on tapahtunut asiantuntijoiden suorittamien manuaalisten toimenpiteiden avulla. Perinteiset toimintamallit eivät kuitenkaan pysy mobiiliverkkojen kasvun perässä, mutta tekoälyn avulla ylläpito- ja huoltoprosessit on mahdollista optimoida. (Li ym., 2020; Yang ym., 2023.)

3.2 Tekoälyn hyödyntämisen haasteet

Tekoälyn hyödyntämiskeinoja 5G mobiiliverkkoteknologiassa on useita ja niiden avulla mm. verkon resurssien käytön tehokkuutta ja suorituskykyä voidaan parantaa. 5G mobiiliverkon rakenne on monikerroksinen sekä monimutkainen ja se tuottaa ennenäkemättömän määrän yhä monimutkaisempaa dataa.

Mobiiliverkoissa käytettävien tekoälyjärjestelmien standardisointi on vielä alkutekijöissään, mikä vaikeuttaa uusien järjestelmien kehitystä sekä käyttöönottoa. Koneoppimisalgoritmit ovat yleisesti tehokkaimmillaan tehtävissä, joissa ei vaadita korkeaa tehtävän toistotaajuutta (engl. high-frequency performance). 5G mobiiliverkoissa tehtävän toistotaajuus on korkea, verkoissa vaaditaan nopeaa datan prosessointitahtia ja äärimmäisen alhaista viivettä. 5G verkon standardisoidut ominaisuudet asettavat tekoälyjärjestelmille kovia vaatimuksia laajempaa käyttöönottoa ajatellen. (Wang ym., 2020.)

Mobiiliverkkoja varten tarkoitettujen tekoälyjärjestelmien kouluttamiseen vaaditaan suuria määriä dataa verkon eri tasoilta. Eri tasoilta saatua dataa käytetään tekoälyjärjestelmien kouluttamisessa. Käyttäjälaitteista tukiasemaan suuntautuvan verkkoliikenteen lisääntyminen kuluttaa verkon resursseja runsaasti. Mobiiliverkkojen kehityksen kannalta on tärkeää kehittää vähemmän koulutusdataa tarvitsevia tekoälyjärjestelmiä. Keskenään erilaisten tekoälyjärjestelmien käyttö mobiiliverkon

saman toiminnon optimointiin eri operaattoreiden toimesta voi tehostamisen sijaan heikentää verkon suorituskykyä. Esimerkkinä järjestelmien erosta on, jos tukiaseman vaihdon laukaiseva raja-arvo eroaa operaattoreiden välillä, voi se johtaa ylimääräisiin tukiaseman vaihdoksiin. Tekoälyä hyödyntävien mobiiliverkkojen rakenteen monimutkaisuuden vuoksi voi olla haastavaa tunnistaa, minkä operaattorin järjestelmät aiheuttavat verkon suorituskykyä heikentävän häiriön. (Shafin ym., 2020.)

4 6G ja Tekoäly

4.1 6G teknologiasta yleisesti

5G mobiiliverkkoteknologia on vielä monelta osin kehityksen alla, mutta siitä huolimatta kuudennen sukupolven 6G-mobiiliverkkoteknologiaa tutkitaan aktiivisesti (Tataria ym., 2021). 6G mobiiliverkkoteknologian odotetaan tuovan 5G:n tapaan suuri määrä uusia teknologisia innovaatioita, kuten lisätty todellisuus (engl. Augmented Reality), holografinen viestintä, älykkäät terveydenhuollon laitteistot, globaali kattavuus sekä täysin autonomisesti toimivat kulkuneuvot. Edellä mainittujen innovaatioiden toteutus käytännössä vaatii jopa usean teratavun yhteysnopeuksia, alle yhden millisekunnin viivettä ja yli 10 miljoonaa yhdistettyä laitetta per neliökilometri. Mobiiliverkkoihin yhdistettyjen laitteiden globaalien määrän odotetaan ylittävän 125 miljardin laitteen rajan vuonna 2030. (Giordani ym., 2020.) Mobiiliverkkoteknologian seuraavan sukupolven kehittäminen on siis hyvinkin ajankohtainen asia, vaikka 5G teknologiaakin kehitetään edelleen.

6G mobiiliverkkojen vaatimien äärimmäisten yhteysnopeuksien saavuttamiseksi verkoissa käytetään yhä 5G verkkoja korkeampia lähetystaajuuksia, joka lisää järjestelmän kapasiteettia. 6G verkkojen taajuusalueeksi on esitetty 100–1000 gigahertsiä. 6G verkkojen käyttöönoton myötä myös 4G ja 5G verkkojen lähetystaajuuksia tulisi käyttää, sillä 6G verkon tarjoama jopa terahertsin lähetystaajuus ei sovellu kaikkien palveluiden toteuttamiseen. Signaalin taajuuden noustessa niiden kantama lyhenee, mutta kantama ja lähetystaajuus eivät skaalaudu lineaarisesti, vaan tietyillä taajuuksilla signaalin heikentyminen saavuttaa paikallisen maksimiarvon. Paikallisten maksimiarvojen välissä olevat lähetystaajuusalueet tarjoavat huomattavan määrän lisäkapasiteettia mobiiliverkkoihin. (Tataria ym., 2021.)

6G mobiiliverkkojen rakenne tulee mitä todennäköisimmin eroamaan suuresti 5G verkoista. Yksi keskeinen ero olisi perinteisestä mobiiliverkon solurakenteesta luopuminen, ja siirtyminen yhtenäisesti toimivaan mobiiliverkkoon. Yhtenäisesti toimivassa mobiiliverkossa ei olisi tarvetta erillisille tukiaseman vaihdoille, jolloin verkon kapasiteettia vapautuisi käyttäjälaitteille ja verkkoon yhdistettyjen laitteiden yhteyden laatu ei vaihtelisi käyttäjän liikkua verkon alueella. (Giordani ym., 2020.) 6G mobiiliverkon on suunniteltu ylettyvän myös avaruuteen, eli 6G mobiiliverkkoon

sisältyisi myös satelliitteja. Satelliittien integroiminen osaksi mobiiliverkkoa mahdollistaisi kaikkialle ulottuvan verkkoyhteyden, jota voisi käyttää ongelmitta myös liikkuvissa kulkuneuvoissa, kuten laivoissa ja lentokoneissa. Yksi suurin satelliittien integrointiin liittyvistä haasteista on satelliittien ja maan pinnalla sijaitsevien asemien suuresta fyysisestä välimatkasta johtuva mobiiliverkkojen kontekstissa suuri viive. (Tataria ym., 2021.)

4.2 Tekoälyn rooli 6G teknologian kehityksessä

6G mobiiliverkkojen rakenne tulee olemaan edeltäjiänsä huomattavasti monimutkaisempi. 6G verkko tuottaa myös huomattavasti 5G verkkoa enemmän dataa, jonka analysointi on tarpeellista verkon toiminnan optimoinnin kannalta. Tekoälyalgoritmeja voidaan hyödyntää 6G verkon tuottaman datan analysoinnissa, joka mahdollistaa verkon suorituskyvyn ja resurssien käytön optimoinnin automatisoinnin. (Yang ym., 2020.)

6G mobiiliverkkoteknologiassa lähes kaikkia verkon eri toimintoja, resursseja sekä laitteistoja tullaan hallinnoimaan keskitetysti tekoälyjärjestelmien avulla (Periannasamy ym., 2022). Tekoälyalgoritmien kehittäminen dynaamista resurssien hallintaa, ennaltaehkäisevää huoltoa, verkon itsekorjautuvuutta ja reaaliaikaisen poikkeavuuden tunnistamista varten on edellytyksenä älykkäästi ympäristön muuttuviin olosuhteisiin sopeutuvan 6G mobiiliverkon kehitykselle. Nykyiset tekoälyalgoritmit eivät ole täysin sopeutuvia 6G verkon tarvitsemiin tehtäviin, sillä algoritmit ovat liian hitaita vastausten muodostamisessa. Nopeammin vastauksia tuottavien tekoälyalgoritmien kehitys on siis erittäin keskeinen ongelma 6G teknologian kannalta. (Alhaj ym., 2023.)

5G mobiiliverkkojen toiminnan tukena käytetyt tekoälyjärjestelmät ovat työkaluja, joiden avulla erillisiä prosesseja tai prosessien tuottamaa dataa voidaan analysoida. 6G mobiiliverkoissa tekoäly on tarkoitus integroida verkon rakenteeseen alusta pitäen, luoden natiivia tekoälyä hyödyntävän mobiiliverkon. Natiivia tekoälyä hyödyntävän mobiiliverkon ns. 'älyllistäminen' on mahdollista, eli järjestelmä voi hallinnoida verkon eri osia autonomisesti sekä tehostetusti. (Zhang ym., 2023.)

5 Yhteenveto

Tämä tutkielma käsittelee tekoälyn hyödyntämistä 5G- ja 6G mobiiliverkkojen toiminnan optimoinnissa ja kehityksessä. Tutkielman tavoitteena on perehdyttää lukija tekoälyn määritelmään ja osa-alueisiin, mobiiliverkkoteknologian kehitykseen sekä tekoälyn merkitykseen mobiiliverkkojen toiminnassa. Lisäksi tutkielmassa tarkastellaan tekoälyn sovellusmuotoja 5G mobiiliverkkojen käyttäjäkokemuksen parantamista ja toiminnan tehostamista varten, sekä 6G-mobiiliverkkoteknologian sekä tekoälyn väliseen suhteeseen.

Tutkielman toinen luku vastaa tutkielman ensimmäiseen tutkimuskysymykseen: *Mitä tekoäly on, miten mobiiliverkkoteknologia on kehittynyt ja miksi tekoäly on mobiiliverkkojen kannalta merkittävä käsite?* Toinen luku alkaa tekoälyn määrittelyllä, Ergen (2019) määrittelee tekoälyn olevan teknologisen muutoksen aalto, jonka seurauksena koneet pystyvät suorittamaan kognitiivisia tehtäviä kuten hahmottaminen, looginen päättely sekä oppiminen. Tekoälyä käsittelevässä tieteellisessä kirjallisuudessa ei tullut vastaan yksiselitteisiä määritelmiä tekoälylle, aihetta käsittelevän kirjallisuuden pohjalta tekoälyjärjestelmien keskeisen tavoitteen voisi todeta olevan ihmisaivojen toiminnan jäljittely. Kreuzer ja Sirrenberg (2019) jakavat tekoälyn neljään eri osaan: tekoälyyn, neuroverkkoihin, koneoppimiseen sekä syväoppimiseen. Näistä osista tekoäly toimii ainoastaan kolmen muun osan kattoterminä. Mobiiliverkkoteknologia on kehittynyt ajallisesti tarkasteltuna tasaisesti, 1G:n ilmestymisen jälkeen, uusi mobiiliverkkosukupolvi on ilmestynyt noin kymmenen vuoden välein. Teknologisesti mobiiliverkkojen kehitys ei ole kuitenkaan ollut yhtä tasaista, 2G verkoista 3G verkkoihin ja 4G verkoista 5G verkkoihin siirryttäessä on tapahtunut harppauksia mobiiliverkkoteknologiassa. Li ym. (2017) näkevät tekoälyn olevan hyvin merkittävä käsite mobiiliverkkojen käyttäjäkokemuksen parantamisen ja toiminnan optimoinnin kannalta, sillä tekoälyalgoritmien avulla mobiiliverkkojen nykyisin tuottama valtavan datamäärän analysointi on mahdollista verkon monimutkaisesta rakenteesta huolimatta. Mobiiliverkkojen kuljettaman datamäärän lisääntyessä tekoälyn merkitys verkon toiminnalle tulee kasvamaan entisestään.

Tutkielman kolmannessa luvussa käsitellään toista tutkimuskysymystä: *Miten tekoälyä voidaan hyödyntää 5G-mobiiliverkon toiminnan ja käyttäjäkokemuksen optimoinnin apuvälineenä?* Tutkielma osoittaa, että tekoälyä voidaan käyttää mm. signaalin

reitityksen optimointiin, verkon energiatehokkuuden parantamiseen, verkon viipaloinnin tehostamiseen, verkkoliikenteen ennakoointiin, kuormituksen tasapainotukseen, tukiaseman vaihdon optimointiin, MIMO-antennien toiminnan tehostamiseen sekä verkon turvallisuuden ja ylläpidon parantamiseen. Kaikilla näillä tekoälysovelluksilla on mahdollista parantaa 5G verkon käyttäjäkokemusta ja tehostaa sen toimintaa. Tutkielma ei ole täysin kattava 5G verkossa hyödynnettävien tekoälyjärjestelmien osalta, aiheesta löytyy runsaasti lisää tutkimustietoa tämän tutkielman lähteiden lisäksi ja aihetta tutkitaan aktiivisesti. Tutkielmassa käsitellyt tekoälyn käyttökohteet keskittyivät 5G verkon keskeisiin teknologioihin, ja aiheisiin, josta oli relevanttia tutkimustietoa saatavilla. 5G-mobiiliverkossa tekoälyä voidaan hyödyntää monella eri tavalla, mutta ainakaan toistaiseksi tekoälysovellukset eivät tarjoa 5G verkoille autonomisen toiminnan mahdollisuutta, vaan sovellusten keskeisin funktio on analysoida verkon tuottamia suuria datamääriä.

Neljäs luku käsittelee kolmatta tutkimuskysymystä: *Mitä uudistuksia kuudennen sukupolven mobiiliverkoilta odotetaan ja mikä on tekoälyn rooli 6G mobiiliverkkoteknologiassa?* 6G mobiiliverkkojen odotetaan ilmestyvän vuoden 2030 tienoilla, ja niiden odotetaan tuovan jopa terahertsin lähetystaajuuksia, yli teratavun yhteysnopeuksia sekä vain satojen mikrosekuntien viive. 6G teknologian myötä mobiiliverkkojen perinteinen solurakenteen on määrä poistua käytöstä, ja tilalle tulee yhtenäisesti toimiva mobiiliverkko, jossa ei ole tarvetta erillisille tukiaseman vaihdoksille. 6G mobiiliverkkojen osaksi tultaisiin integroimaan satelliitteja, joiden avulla voitaisiin taata luotettava verkkoyhteys myös laivassa tai lentokoneessa yms. oleville käyttäjälaitteille. Periannasamy ym. (2022) kertoo, että tekoälyn rooli tulee olemaan erittäin keskeinen 6G mobiiliverkoissa, lähes kaikkia verkon eri toimintoja, resursseja sekä laitteistoja tullaan hallinnoimaan keskitetysti tekoälyn avulla. Zhang ym. (2023) tiivistävät tekoälyn merkityksen 6G teknologiassa: tekoälyn integrointi osaksi 6G verkon rakennetta mahdollistaa mobiiliverkkojen ns. 'älyllistämisen', jolloin tekoälyjärjestelmät voivat hallinnoida verkkoa autonomisesti.

Tekoälyllä, ja sen sovelluskeinoilla on ratkaiseva rooli 5G- ja 6G mobiiliverkkojen toiminnan optimoinnissa. Tekoäly antaa mobiiliverkkojen operaattoreille mahdollisuuden vastata verkkojen monimutkaistuvasta rakenteesta ja kasvavasta datamäärästä johtuviin haasteisiin samalla parantaen palvelun laatua ja vähentäen kustannuksia. Tekoälyn hyödyntämiseen mobiiliverkkoteknologiassa liittyy kuitenkin

myös haasteita. Haasteita ovat mm. standardisoinnin puute, koulutusdatan kasvava tarve ja eri palveluntarjoajien tekoälyjärjestelmien potentiaalinen yhteensopimattomuus.

Tutkielma antaa kattavan kokonaiskuvan tekoälyn hyödyntämisestä 5G- ja 6G mobiiliverkkojen toiminnan optimoinnissa ja kehityksessä. Tutkielma auttaa ymmärtämään tekoälyn eri sovellusmuotoja ja niiden tuomia hyötyjä sekä haasteita mobiiliverkkoteknologian kannalta. Tutkielman aiheesta on niukasti suomenkielistä sisältöä, tutkielmassa on käännetty useita tekoälyyn ja mobiiliverkkoon liittyviä englanninkielisiä termejä mahdollisimman helposti ymmärrettävään muotoon, joka saattaa lisätä tutkielman hyödyllisyyttä. Jatkotutkimusmahdollisuuksia tutkielman aiheeseen liittyen on runsaasti. Jatkotutkimusmahdollisuuksia olisi esimerkiksi mobiiliverkkoteknologiassa hyödynnettävien tekoälysovellusten toimintamekanismien sekä tekoälyn hyödyntämisen haasteiden tarkempi suomenkielinen tutkimus.

Lähteet

- Ahammadi, A., Hassan, W. H., & Shamsan, Z. A. (2022). An Overview of Artificial Intelligence for 5G/6G Wireless Networks Security. *2022 International Conference on Cyber Resilience (ICCR)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICCR56254.2022.10024692>
- Alhaj, N. A., Jamlos, M. F., Manap, S. A., Abdelsalam, S., Bakhit, A. A., Mamat, R., Jamlos, M. A., Gismalla, M. S. M., & Hamdan, M. (2023). Integration of Hybrid Networks, AI, Ultra Massive-MIMO, THz Frequency, and FBMC Modulation Toward 6G Requirements: A Review. *IEEE Access*, *12*, 483–513.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3345453>
- Ashour, A. F., & Fouda, M. M. (2023). AI-Based Approaches for Handover Optimization in 5G New Radio and 6G Wireless Networks. *2023 International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering (ICCoSITE)*, 336–341. <https://doi.org/10.1109/ICCoSITE57641.2023.10127687>
- Balmer, R. E., Levin, S. L., & Schmidt, S. (2020). Artificial Intelligence Applications in Telecommunications and other network industries. *Telecommunications Policy*, *44*(6), 101977. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101977>
- Burzykowski, T., Rousseau, A.-J., Geubbelmans, M., & Valkenburg, D. (2023). Introduction to machine learning. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, *163*(5), 732–734.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.02.005>
- Camargo, J. S., Coronado, E., Ramirez, W., Camps, D., Deutsch, S. S., Pérez-Romero, J., Antonopoulos, A., Trullols-Cruces, O., Gonzalez-Diaz, S., Otura, B., & Rigazzi, G. (2023). Dynamic slicing reconfiguration for virtualized 5G networks using ML forecasting of computing capacity. *Computer Networks*, *236*, 110001.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110001>
- Chabot, P. J., Cirino, C. M., & Gulotta, L. V. (2023). Machine learning: The what, why, and how. *Seminars in Arthroplasty: JSES*, *33*(4), 857–861.
<https://doi.org/10.1053/j.sart.2023.06.018>
- Chen, M., Challita, U., Saad, W., Yin, C., & Debbah, M. (2019). Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *21*(4), 3039–3071.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2926625>

- Choi, R., Coyner, A., Kalpathy-Cramer, J., Chiang, M., & Campbell, J. (2020). Introduction to Machine Learning, Neural Networks, and Deep Learning. *Translational vision science & technology*, 9, 14.
<https://doi.org/10.1167/tvst.9.2.14>
- da Silva Brilhante, D., de Rezende, J. F., & Marchetti, N. (2024). Handover optimisation for high-capacity low-latency 5G NR mmWave communication. *Ad Hoc Networks*, 153, 103328. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103328>
- Dhapte, A. (2024). *AI In Telecommunication Market Size & Share Report, 2032*.
<https://www.marketresearchfuture.com/reports/ai-in-telecommunication-market-6803>
- Ergen, M. (2019). What is Artificial Intelligence? Technical Considerations and Future Perception. *The Anatolian Journal of Cardiology*.
<https://doi.org/10.14744/AnatolJCardiol.2019.79091>
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. (2020). Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 55–61. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- Han, S., Chih-Lin, I., Li, G., Wang, S., & Sun, Q. (2017). Big Data Enabled Mobile Network Design for 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 150–157. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600911>
- Hassan, N., Yau, K.-L. A., & Wu, C. (2019). Edge Computing in 5G: A Review. *IEEE Access*, 7, 127276–127289. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938534>
- Hodara, H., & Skaljo, E. (2021). From 1G to 5G. *Fiber and Integrated Optics*, 40(2–3), 85–183. <https://doi.org/10.1080/01468030.2021.1919358>
- Hongvanthong, S. (2020). Novel Four-Layered Software Defined 5G Architecture for AI-based Load Balancing and QoS Provisioning. *2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, 859–863.
<https://doi.org/10.1109/ICCCS49078.2020.9118463>
- Islam, Md. T., Syfullah, Md. K., Islam, J., Quadir, H. M. S., Rashed, Md. G., & Das, D. (2023). Exploring the Potential: ML vs. DL in Network Security with Explainable AI (XAI) Insights. *2023 26th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICCIT60459.2023.10441363>
- Javid, I., & Khara, S. (2022). 5G Network: Architecture, Protocols, Challenges and Opportunities. *2022 International Conference on Computing, Communication,*

and Intelligent Systems (ICCCIS), 1–5.

<https://doi.org/10.1109/ICCCIS56430.2022.10037605>

Jha, S. K., Singh, A. V., & Rana, A. (2021). Opportunities and Applications of 5G Network Technology. *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 1–4.

<https://doi.org/10.1109/ICRITO51393.2021.9596242>

Jiang, D., Wang, Z., Wang, W., Lv, Z., & Choo, K.-K. R. (2022). AI-Assisted Energy-Efficient and Intelligent Routing for Reconfigurable Wireless Networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 9(1), 78–88.

<https://doi.org/10.1109/TNSE.2021.3075428>

Kanaka Chary, M., Vamshi Krishna, C. H., & Rama Krishna, D. (2024). Accurate channel estimation and hybrid beamforming using Artificial Intelligence for massive MIMO 5G systems. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 173, 154971. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154971>

Khedkar, A., Musale, S., Padalkar, G., Suryawanshi, R., & Sahare, S. (2023). An Overview of 5G and 6G Networks from the Perspective of AI Applications. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 104(6), 1329–1341.

<https://doi.org/10.1007/s40031-023-00928-6>

Ko, K.-M., Baek, J.-M., Seo, B.-S., & Lee, W.-B. (2023). Comparative Study of AI-Enabled DDoS Detection Technologies in SDN. *Applied Sciences*, 13(17), Article 17.

<https://doi.org/10.3390/app13179488>

Kreutzer, R. T., & Sirrenberg, M. (2020). What Is Artificial Intelligence and How to Exploit It? Teoksessa R. T. Kreutzer & M. Sirrenberg (Toim.), *Understanding Artificial Intelligence: Fundamentals, Use Cases and Methods for a Corporate AI Journey* (ss. 1–57). Springer International Publishing.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-25271-7_1

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

Lee, J., Kim, H., Park, C., Kim, Y., & Park, J.-G. (2022). AI-based Network Security Enhancement for 5G Industrial Internet of Things Environments. *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 971–975.

<https://doi.org/10.1109/ICTC55196.2022.9952490>

- Li, M., Huo, M., Cheng, X., & Xu, L. (2020). Research and Application of AI in 5G Network Operation and Maintenance. *2020 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking (ISPA/BDCLOUD/SocialCom/SustainCom)*, 1420–1425.
<https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCLOUD-SocialCom-SustainCom51426.2020.00212>
- Li, R., Zhao, Z., Zhou, X., Ding, G., Chen, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2017). Intelligent 5G: When Cellular Networks Meet Artificial Intelligence. *IEEE Wireless Communications*, *24*(5), 175–183.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600304WC>
- Luo, G., Yuan, Q., Li, J., Wang, S., & Yang, F. (2022). Artificial Intelligence Powered Mobile Networks: From Cognition to Decision. *IEEE Network*, *36*(3), 136–144.
<https://doi.org/10.1109/MNET.013.2100087>
- Mahmoud, H. H. H., & Ismail, T. (2020). A Review of Machine learning Use-Cases in Telecommunication Industry in the 5G Era. *2020 16th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 159–163.
<https://doi.org/10.1109/ICENCO49778.2020.9357376>
- Mao, Q., Hu, F., & Hao, Q. (2018). Deep Learning for Intelligent Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *20*(4), 2595–2621. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2846401>
- Maurya, M., Puranik, V. G., Kumar, A. S., & Subramanian, B. (2023). 1 Introduction to artificial intelligence. Teoksessa *1 Introduction to artificial intelligence* (ss. 1–20). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783111323749-001>
- Park, H.-S., Kim, H., Lee, C., & Lee, H. (2024). Mobility Management Paradigm Shift: From Reactive to Proactive Handover using AI/ML. *IEEE Network*, 1–1.
<https://doi.org/10.1109/MNET.2024.3357108>
- Periannasamy, S. M., Thangavel, C., Latha, S., Reddy, G. V., Ramani, S., Phad, P. V., Chandline, S. R., & Gopalakrishnan, S. (2022). Analysis of Artificial Intelligence Enabled Intelligent Sixth Generation (6G) Wireless Communication Networks. *2022 IEEE International Conference on Data Science and Information System (ICDSIS)*, 1–8.
<https://doi.org/10.1109/ICDSIS55133.2022.9915945>

- Qi, J., Wu, F., Li, L., & Shu, H. (2007). Artificial intelligence applications in the telecommunications industry. *Expert Systems*, 24(4), 271–291.
<https://doi.org/10.1111/j.1468-0394.2007.00433.x>
- Sadrehaghghi, I. (2023). *Artificial Intelligence (AI) & Machine Learning (ML/DL/NNs)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20926.05444>
- Searle, J. (1984). Can computers think. *Minds, brains, and science*, 28–41.
- Selvamanju, E., & Shalini, V. B. (2021). Machine Learning Based Mobile Data Traffic Prediction in 5G Cellular Networks. *2021 5th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 1318–1324.
<https://doi.org/10.1109/ICECA52323.2021.9675887>
- Senthilvel, P. G., R, T. D., K, R. K., Palani, H. K., & Sundravadivelu, K. (2023). Enhancing Wireless Mesh Network Performance Through AI-Based Routing Algorithms. *2023 International Conference on Communication, Security and Artificial Intelligence (ICCSAI)*, 931–935.
<https://doi.org/10.1109/ICCSAI59793.2023.10421320>
- Shafin, R., Liu, L., Chandrasekhar, V., Chen, H., Reed, J., & Zhang, J. C. (2020). Artificial Intelligence-Enabled Cellular Networks: A Critical Path to Beyond-5G and 6G. *IEEE Wireless Communications*, 27(2), 212–217.
<https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900323>
- Shahen Shah, A. F. M. (2022). A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies. *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 1117–1123. <https://doi.org/10.1109/CCWC54503.2022.9720781>
- Tapia, P., Palacios, E., & Noël, L. (2018). *Implementing Operational AI in Telecom Environments*. <https://s3.eu-west-1.amazonaws.com/attachments.apirocket.io/0x0qemr0/Whitepaper/tupl-whitepaper-operational-ai.pdf>
- Tataria, H., Shafi, M., Molisch, A. F., Dohler, M., Sjöland, H., & Tufvesson, F. (2021). 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 109(7), 1166–1199.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3061701>
- Vieira, S., Lopez Pinaya, W. H., & Mechelli, A. (2020). Chapter 1—Introduction to machine learning. Teoksessa A. Mechelli & S. Vieira (Toim.), *Machine*

Learning (ss. 1–20). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815739-8.00001-8>

- Vikranth, K., Shathik, J. A., Jeetha, & Prasad, K. K. (2020). Future enhancements and propensities in forthcoming communication system – 5G Network Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1712(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1712/1/012006>
- Wang, C.-X., Renzo, M. D., Stanczak, S., Wang, S., & Larsson, E. G. (2020). Artificial Intelligence Enabled Wireless Networking for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Wireless Communications*, 27(1), 16–23. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900292>
- Xin, P., Wang, H., Liu, Y., Chen, J., Song, T., & Wang, D. (2023). An Artificial Intelligence-Assisted Expectation Propagation Detection for MIMO Systems. *Electronics*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/electronics12020388>
- Yadav, R., Tripathi, A., Pathak, S., & Gill, H. S. (2022). 5G and Beyond Networks for 3D MIMO Using Artificial Intelligence in 5G Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2273(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2273/1/012007>
- Yang, H., Alphones, A., Xiong, Z., Niyato, D., Zhao, J., & Wu, K. (2020). Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks. *IEEE Network*, 34(6), 272–280. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000195>
- Yang, Y., Yang, S., Zhao, C., & Xu, Z. (2023). TelOps: AI-Driven Operations and Maintenance for Telecommunication Networks. *IEEE Communications Magazine*, 62(4), 104–110. <https://doi.org/10.1109/MCOM.003.2300055>
- Zhang, C., Zhang, H., Yuan, D., & Zhang, M. (2018). Citywide Cellular Traffic Prediction Based on Densely Connected Convolutional Neural Networks. *IEEE Communications Letters*, 22(8), 1656–1659. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2841832>
- Zhang, H., Xu, S., Xing, Z., Li, F., Xin, J., & Zhang, C. (2023). Research on Applications of AI in Wireless Network. *Proceedings of the 7th International Conference on Control Engineering and Artificial Intelligence*, 31–36. <https://doi.org/10.1145/3580219.3580226>