

*Next-G Wireless: Tanulságok az 5G techno-
gazdaságtanból a következő generációs vezeték nélküli
technológiák megismertetése érdekében*

Edward Oughton George Mason Egyetem eoughton@gmu.edu	William Lehr MIT wlehr@mit.edu
--	--------------------------------------

TPRC49 (2021.

szeptember) Összefoglaló

Az 1980-as évek óta minden évtizedben új generációs cellatechnológiát vezettek be. Jelenleg a mobilhálózat-üzemeltetők (MNO-k) az ötödik generációs (5G) cellatechnológia globális kereskedelmi bevezetésének közepette vagyunk, és ezzel párhuzamosan a következő generáció (6G) megtervezése is zajlik. Ez megfelelő alkalmat kínál arra, hogy értékeljük az elmúlt évtized techno-gazdaságtani kutatási irodalmát, amely az 5G fejlesztési életciklusát a szabványosítástól a bevezetésig kísérte. Célunk, hogy visszatekintő áttekintést nyújtsunk erről az irodalomról, és ajánlásokat tegyünk arra vonatkozóan, hogy az ilyen stílusú modellalapú (elméleti és empirikus) kutatásban alkalmazott módszertanok hogyan fejleszthetők, hogy a lehető legjobban hozzájáruljanak a következő generációs (Next-G) vezeték nélküli technológiák tervezéséhez. Áttekintésünk az előzetes kutatásokat nyolc kulcsfontosságú kutatási témakörbe sorolja, köztük a felhasználási esetek, technológiák, modellezési technikák, pénzügyi mérőszámok, nyílt tudományos gyakorlatok, üzleti modellértékelés, térbeli fókusz és adatvizualizáció. A korábbi szakirodalom áttekintése arra enged következtetni, hogy a Next-G (vagy 6G) technológiák tervezésére irányuló műszaki-gazdasági értékelő tanulmányok minősége és hatása javulna, ha a kutatók: (i) átláthatóbbak lennének a hálózati szolgáltatásminőségi feltételezésekkel kapcsolatban, (ii) nyíltan megosztanák a bemeneti adatokat, a kódot és az eredményeket, (iii) a teljes költségelemzésre összpontosítanának, különös tekintettel (iv) a 6G technológiák megfizethetőségének biztosítására, és, (v) aktívan figyelembe veszi a más modellezési erőfeszítésekből származó fejleményeket a kölcsönös előnyök lehetőségeinek maximalizálása érdekében.

Kulcsszavak: JEL-osztályozás: 5G, 6G, vezeték nélküli, celluláris, mobil, hálózat,

techno-gazdaságtan, modellek: O32, O33, O39, D84, D89

1. Bevezetés

Az első (1G) hálózatok 1980-as évekbeli kereskedelmi bevezetése óta minden évtizedben új generációs cellatechnológia érkezik. Jelenleg az ötödik generációs ("5G") mobiltechnológia kereskedelmi bevezetésének korai szakaszában vagyunk, és a következő generációs ("6G") mobiltechnológia fejlesztésének korai szakaszában.

2021 közepétől a mobilhálózat-üzemeltetők (MNO-k) az Egyesült Államokban és világszerte 5G-szolgáltatásokat telepítettek, és bár a lefedettség és az elfogadás száma gyorsan növekszik, az elfogadás számos magas jövedelmű piacon még mindig alacsony (GSMA, 2020). Ráadásul a kereskedelmi forgalomban kapható ajánlatok egyike sem nyújtja az ITU IMT2020-víziója (International Telecommunication Union, 2015) által megcélzott 5G teljesítménymérők teljes spektrumát, és a képességek teljes spektruma csak a 3GPP 16. vagy 17. kiadása után, a 2020-as években jelenhet meg (3GPP, 2021). Az iparági résztvevők azonban már most is tervezik a vezeték nélküli hálózatok következő generációját (Next-G), köztük a "6G"-t támogató használati eseteket, teljesítménykövetelményeket és műszaki előírásokat (Bhat és AlQahtani, 2021; Giordani et al., 2020; Khan et al., 2020; You et al., 2020).

Ez egy ismerős, bár rendetlen folyamat, amely megismétlődött, ahogy a vezeték nélküli technológiák egymást követő életciklusai a fejlesztési laboratóriumokból a kereskedelmi bevezetésen keresztül vándorolnak, hogy végül örökölt technológiává váljanak (Kar and Sanyal, 2019; Monserrat et al., 2020; Sathya et al., 2020; Zugno et al., 2020). Bár nem vagyunk közel az 5G életciklusának végéhez, de az 5G kezdetének végén vagyunk, ami kedvező alkalmat teremt arra, hogy bányásszuk a tanulságokat, amikor elkezdjük megfogalmazni a vezeték nélküli technológiák következő generációjának terveit, amelyek közül sokan a 6G-jelölt technológiák lesznek.

A piaci erők irányítják az új vezeték nélküli technológiák tervezését, bevezetését és sikerét (Frank, 2011). A vállalkozások, a fogyasztók és a politikai döntéshozók - együttesen az iparági érdekeltek

- beruházási, fogyasztási és egyéb stratégiai döntéseiket részben a szaksajtóból és a különböző tudományágak által készített kutatási tanulmányokból nyert ismeretekre támaszkodva hozzák meg. Érthető, hogy e kutatások nagy része a műszaki mérnöki és informatikai szempontokra összpontosít, de ez azzal a potenciális kárral járhat, hogy nem értik meg a különböző műszaki fejlesztések gazdasági költségvonzatát (Oughton és Jha, 2021). Hasonlóképpen, a vezeték nélküli hálózatokkal kapcsolatos nem műszaki jellegű kutatások nagy részét nem tájékoztatták megfelelően a feltörekvő technológiák, például az 5G műszaki részletei. A "techno-ökonómiai" kutatások mind a vezeték nélküli technológiák műszaki részletein, mind pedig olyan piacgazdasági megfontolásokon alapulnak, amelyek azt veszik figyelembe, hogy az új funkciók mennyibe kerülnek az általuk a fogyasztók és a vállalkozások számára nyújtható szolgáltatásfejlesztésekhez képest, és segíthetnek áthidalni a szakadékot, hogy lehetővé tegyék a megalapozottabb döntéshozatalt (Oughton et al., 2021).

E tanulmány célja, hogy áttekintse az elmúlt évtizedben végzett, az 5G fejlesztéséhez hozzájáruló technoökonómiai kutatásokat, hogy jobban megértsük, hogyan lehetne az ilyen kutatásokat fejleszteni, hogy jobban tájékoztassák a döntéshozatalt a következő generációs vezeték nélküli technológiák fejlesztési folyamata során. Az általunk vizsgált kutatási kérdések a következők:

1. Melyek a fő tendenciák az 5G értékelésére szolgáló műszaki-gazdasági módszerek használatában?
2. Mi működött és mi nem az 5G értékelésére szolgáló módszerek alkalmazása során?
3. Hogyan javítható e módszerek használata a jövőbeni Next-G szakpolitikai döntések

(pl. 6G) támogatása érdekében?

Page of 231

Mielőtt belekezdenénk a tanulmány fő munkájába, először egy gyors áttekintést nyújtunk az 5G jelenlegi helyzetéről (2. szakasz), majd meghatározzuk, hogy mit értünk "technogazdasági" kutatás alatt (3. szakasz). Az 5G-technológiai szakirodalom áttekintése a következő szakaszban található 4, az 5. szakaszban pedig kutatási következtetéseinket és ajánlásokat fogalmazunk meg arra vonatkozóan, hogy miként lehet ezeket a kutatási módszereket fejleszteni.

2. Az 5G kontextus, felhasználási esetek és technológiák

A mobiltechnológiák első négy generációja során, amely a 2010-ben bevezetett 4G-korszakban csúcsosodott ki, az MNO-k által elfogadott fő üzleti modell a fogyasztói előfizetések értékesítésére összpontosított, az előfizetőnkénti havi forgalomfelhasználás mennyisége alapján (Lehr et al., 2021). Mivel azonban a legtöbb piacon maximalizálták az emberi előfizetők számát, és a korlátlan adatsomagok felé történő elmozdulással az üzemeltetők új bevételi források azonosítására helyezték át a hangsúlyt, potenciálisan új 5G-szolgáltatások révén.

E bevételnövekedés elérése érdekében az mobilhálózat-üzemeltetők a "vertikumokat" kívánják megcélolni, amelyek az 5G-szolgáltatások különböző ipari ágazatokban történő használatára utalnak (Rendón Schneir et al., 2018). A korábbi generációkhoz képest ez potenciálisan bomlasztó változást jelenthet a vezeték nélküli összeköttetések elfogadásának és használatának módját illetően a vállalkozások számára (Cave, 2018). E vertikális ágazatok közé tartozik az energia (Hui et al., 2020), a közlekedés és logisztika (Ashraf et al., 2020; Garcia et al., 2021), az egészségügy, az élő rendezvények (Hoeschele et al., 2021), a gyártás, valamint sok más ágazat. Ezeknek az új vezeték nélküli 5G szolgáltatásoknak a kiépítéséhez azonban az egyes vertikális ágazati üzleti modellek kapcsolódási követelményeinek megfelelő szoftver, hardver és spektrum egyedi formáira lesz szükség (Massaro és Beltrán, 2020; Matinmikko et al., 2018; Vuojala et al., 2019).

E törekvés sikere az egyes ipari ágazatokban a műszaki és gazdasági életképességtől függ. Ez az életképesség a megvalósítás költségeit tükrözi a vállalkozások és a fogyasztók által fizetni hajlandó érzékelt értékkel szemben (Lemstra, 2018). Egyértelmű üzleti indoklás nélkül mind a befektetők, mind a hálózatüzemeltetők nem fogják vállalni az új 5G-szolgáltatások bevezetéséhez szükséges beruházásokat (Rendon Schneir et al., 2019).

Az 5G fő műszaki jellemzői az elmúlt évtizedben alakultak ki, hogy három fő felhasználási esetet támogassanak, amelyeket a következőkként azonosítottak: továbbfejlesztett mobil szélessávú (eMBB), tömeges géptípusú kommunikáció (mMTC) és rendkívül megbízható, alacsony késleltetésű kommunikáció (uRLLC) (Agiwal et al., 2016; Dogra et al., 2020). E három közül csak az első bizonyult széles körben sikeresnek az MNO-k számára. Az mMTC és az uRLLC piaci potenciálja és az MNO-k szerepvállalása ezeken a piacokon, amennyiben azok a remélt fejlődésnek megfelelően alakulnak, továbbra is spekulatív.

Az Enhanced Mobile Broadband (eMBB) a 4G rendkívül sikeres mobil szélessávú felhasználási esetének kiterjesztése, amely az okostelefonok elterjedésével együtt világszerte több milliárd okostelefon- és táblagép-felhasználó kezébe juttatta a tömegmédiá tartalmakat, alkalmazásokat és mobilszolgáltatásokat. A 4G-ben azonban az okostelefonok gyors elterjedése és a mobil szélessávú szolgáltatások használata miatt a mobilhálózatok gyakran telítődtek a nagy felhasználói sűrűségű hotspotok igényei miatt, különösen a forgalmas napszakokban (pl. délután 5 óra). Az eMBB célja, hogy a spektrális hatékonyság növelésével drasztikusan növelje az egy cellára jutó adatátviteli sebességet egy szélesebb lefedettségű területen, hogy sokkal több, egyidejűleg jó minőségű multimédiás tartalmat igénylő felhasználót támogasson (Chen et al., 2020; Wan et al., 2018). Az eMBB megvalósítása az 5G infrastruktúra és szolgáltatások kiépítésének első fázisának tekinthető, mivel lehetőség

van a nem szándékos 5G használatára, ahol az 5G új rádiós (5G NR) interfész megvalósítása a 4G Evolved Packet Core (EPC) újrafelhasználása mellett történik. Így az eMBB mobilhálózat-üzemeltetők általi 5G üzleti érvelése jól bizonyított mind az alábbiak szerint

a kapacitásnyújtási költségek csökkentésének szükségessége, valamint a versenynyomás és a fogyasztók egyre nagyobb adatigénye miatt.

A tömeges géptípusú kommunikáció (mMTC) szinonimája a dolgok internetének (IoT) széles körben ismert fogalmának, de az 5G-ben különös jelentőséggel bír a "vertikális" ipari felhasználás, más néven az ipari internet vagy dolgok (IIoT) felé (Narayanan et al., 2020; Navarro-Ortiz et al., 2018; Zhang et al., 2019). Számos iparág korábban túlnyomórészt vezetékes vagy Wi-Fi-kapcsolatra támaszkodhatott az érzékelők felhasználása során a termelési folyamat során, de az e területen bekövetkezett új fejlemények, különösen a helyi magánspektrum-licencek elérhetősége, növelte a mobilkapcsolat vonzerejét egyes üzleti modellek esetében, ahol a termelési létesítményen belüli mobilitás elengedhetetlen (Ahokangas et al., 2021; T. Jiang et al., 2021). A vezeték nélküli IoT-alkalmazások terén elért jelentős előrelépés és a bizonyított üzleti érvek ellenére az MNO-k és a cellás 5G technológiák szerepe e piaci lehetőség kielégítésében még kialakulóban van. Az IoT-eszközök és a támogató alkalmazászoftverek és hardverintegráció piaci továbbra is széttöredezettek.

Az ultra-megbízható, alacsony késleltetésű kommunikáció (uRLLC) az 5G New Radio-ban szerepel, hogy vezeték nélküli kapcsolatot biztosítson azon felhasználási esetek számára, amelyeknek nagyon szigorú megbízhatósági és késleltetési követelményei vannak (Angjelichinoski et al., 2019; Le et al., 2021). Ilyen felhasználási esetek lehetnek az ipari automatizálás vagy a közlekedési rendszerek típusai (Sachs et al., 2019), ahol az információátvitel időérzékeny (pl. ms 1késleltetés) lehet, nagy megbízhatósággal (azaz alacsony hibaarányal), de nagy sebességű mobilitást is igényelhet (pl. UAV-k, AV-k) (Avranas et al., 2018; Pokhrel et al., 2021; Sachs et al., 2018). Ez vitathatatlanul az 5G egyik legújyszerűbb jellemzője az e technológiát megelőző generációk rendszereihez képest (Popovski et al., 2018), de az ilyen szigorú teljesítménykövetelményeknek megfelelni képes hálózatok széles körű kereskedelmi megvalósítása valószínűleg a 3GPP szabvány jövőbeli kiadásaitól függ; és alternatív műszaki lehetőségekkel fog küzdeni. Az ITU (2015) felhasználási esetei által megcélzott három központi piaci lehetőség közül az uRLLC az, amelyik a legtávolabb van a kereskedelmi megvalósítástól.

Az 5G műszaki kialakítása mindhárom említett felhasználási esetre vagy piaci lehetőségre az elmúlt évtizedben számos K+F-technikai innováció és előrelépés előnyeit élvezte, és azoktól függ. A legfontosabb fejlesztések közül néhányat az 1. táblázat foglalja össze, a vonatkozó kutatásokra mutató hivatkozásokkal együtt.

Az 5G-hez hozzájáruló K+F1 technikai innováció

Technikai innováció	Minta Kutatás
A milliméteres hullámspektrum használata	(Bogale és Le, 2016; Mezzavilla et al., 2018)
Tömeges MIMO	(Alsharif és Nordin, 2017; Elijah et al., 2016; Nadeem et al., 2018; Prasad et al., 2017)
Kis cellák	(Al-Turjman et al., 2019; De Ree et al., 2019; Saha, 2020; Torre et al., 2020)
Többszörös hozzáférésű Edge computing	(Pham et al., 2020; Siriwardhana et al., 2021; Taleb et al., 2017)
Hálózati szeletelés	(Chahbar et al., 2021; Oladejo and Falowo, 2020; Shu and Taleb, 2020; Wijethilaka and Liyanage, 2021)
Modulációs és többszörös hozzáférési fejlesztések	(Basar, 2016; Cai et al., 2018; Cheng et al., 2018)
Kooperatív lokalizáció	(Zhang et al., 2017)
Virtualizált heterogén hálózatok	(Gures et al., 2020; Xu et al., 2021; Zhou et al., 2020), amelyek közé tartoznak a műholdak (Fang et al., 2021; Lagunas et al., 2020; Leyva- Mayorga et al., 2020) és a pilóta nélküli légi járművek (UAV) (Giordani és Zorzi, 2021; X. Jiang et al., 2021; Liu et al., 2021)

Mielőtt rátérnénk a szakirodalom áttekintésére, hadd magyarázzuk el, mit értünk "techno-gazdasági" kutatás alatt.

3. A techno-gazdaságtan meghatározása

A továbbiakban a "techno-gazdaságtan" fogalmát a mérnöki tudományágakban elfogadott kvantitatív modellezési megközelítésre korlátozzuk, amelyet különbözőképpen "techno-gazdasági értékelésnek", "techno-gazdasági elemzésnek" (TEA) vagy "techno-gazdasági modellezésnek" (TEM) neveznek (Kobos et al., 2020). Egy ilyen értékelési paradigma célja, hogy képes legyen kvantitatív módon értékelni a különböző típusú mérnöki rendszerek gazdasági teljesítményét, valamint számszerűsíteni a tágabb értelemben vett környezeti hatásokat. A TEA-technikákat széles körben alkalmazzák új technológiák modellezésére, és széles körű alkalmazásra találtak a vegyipari és biomérnöki alkalmazásokban (pl. az alternatív bioüzemanyagok kereskedelmi potenciáljának modellezésére).

Hagyományosan ezen a területen általában táblázatkezelési modellezést alkalmaztak, de egyre inkább szoftveralapú megközelítéseket alkalmaznak, amelyek nagyobb rugalmasságot és szigorúságot biztosítanak a modellezési folyamatban, különösen az olyan fejlett technikák alkalmazása tekintetében, mint az érzékenységelemzés vagy a Monte Carlo-szimuláció.¹ A "gazdasági" szempontot a kínálat költségeinek és az értékelt áruk és szolgáltatások potenciális keresletének modellezése szempontjából fejlesztették ki egy adott mérnöki rendszeren keresztül. A kínálati oldali költségeket gyakran a tőke és a beruházási költségek keverékének formájában ragadják meg.

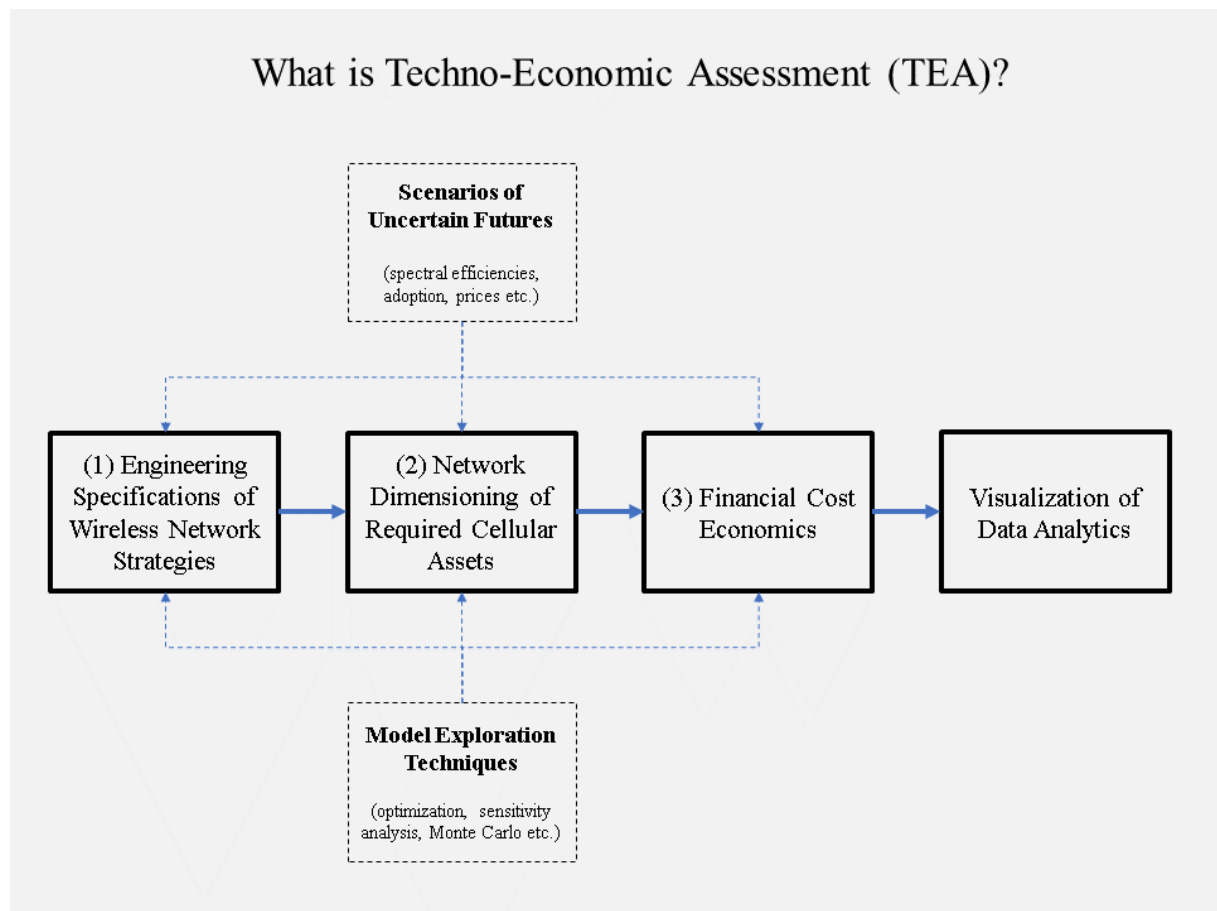
¹ Például a bioüzemanyagokkal kapcsolatos alkalmazásokban több olyan cég is van, amely speciális TEA modellező platformokat kínál (Berkeley, 2021). Az ilyen elemzések modellezik a bioüzemanyag-egységfolyamatokat, például az alapanyag-kezelést, az erjesztést és a

szennyvízkezelést, folyamattervezés, tömeg-energia mérleg, költségbecslés, jövedelmezőségi elemzés és érzékenységi elemzés segítségével.

a termeléssel kapcsolatos működési költségek, és hogy ezek együttesen hogyan adnak betekintést a teljes tulajdonlasi költségbe (TCO) egy adott eszközkészlet élettartama alatt. A TCO-t gyakran úgy kapjuk meg, hogy egy diszkontált készpénzelemzést (DCA) végzünk, hogy a beruházások egy adott időszakra vonatkozó halmazát egy adott nettó jelenértékre (NPV) redukáljuk. Ezek a költségek ezután a potenciális keresleti oldali bevételhez viszonyíthatók, ami betekintést nyújt a beruházások megtérülésébe (RoI) és a belső megtérülési rátába (IRR).

Az 1. ábra általános elméleti áttekintést ad arról, hogyan alkalmazzák a TEA-t a mérnöki tudományokban, különösen a cellás rendszerek, például az 5G és (a jövőben) a 6G értékelését illetően.

Ábra A műszaki-gazdasági értékelés folyamatának meghatározása



Három fő lépést azonosítottunk. Először is, a lépésben a1 különböző cellatechnológiákat képviselő műszaki specifikációkat határozzuk meg. Számos értékelés egy adott cellás rendszer kapacitásának és lefedettségének modellezésére összpontosít különböző szolgáltatásminőségi szintek esetén. A kapacitásközpontú műszaki előírások például i. a cellás technológia spektrális hatékonyságára, ii. a modellezett hordozócsatorna rendelkezésre álló spektrumsáv szélességére és iii. a meglévő telephelyek cellasűrűségére és szektorizáltsági szintjére összpontosítanak. Egyes tanulmányok az energiafogyasztásra is kiterjednek, és az egyes technológiák villamosenergia-fogyasztási szintjének számszerűsítésére összpontosíthatnak.

Másodszor, a 2. lépésben számszerűsítik a hálózati eszközök és egyéb kapcsolódó összetevők számát, egy adott szolgáltatásminőséghez, amelyet a gyakran 1. a 2. lépésben meghatározott mérnöki specifikációk alapján érnek el.

ezek a mennyiségek általában egy meghatározott statisztikai keretbe vannak illesztve, amely tükrözi a térbeli és időbeli megbízhatósági kritériumokat.

Végül a 3. lépésben általában vállalati pénzügyi technikákat alkalmaznak, hogy felmérjék egy adott vezeték nélküli hálózati architektúra kiépítésével járó tőke- és működési kiadások körét. A TCO-t ideális esetben az eszköz és a hálózat élettartama során felmerülő Capex- és Opex-kifizetések körének megragadására használják. Ez gyakran magában foglalja a kereslethez kapcsolódó mérőszámok, például a RoI előállítását is.

A TEA-modellek különösen fontosak azon érdekelt felek számára, akik érdekeltek a modellezett technológiát alkalmazó szolgáltatásokba való befektetés és azok bevezetése vagy termékek kínálata kereskedelmi életképességének értékelésében. Az ilyen modellek eredményei a stratégiai tervekhez és a beruházási döntésekhez, valamint a verseny és a piaci dinamika értékeléséhez szolgáltatnak inputot.

Mielőtt rátérnénk az 5G TEA szakirodalom áttekintésére, érdemes megemlíteni más kvantitatív módszereket, amelyeket az érdekelt felek rendszeresen alkalmaznak a következő generációs vezeték nélküli hálózatokkal kapcsolatos gazdasági és politikai döntéshozatalhoz. Ezek közé tartozik az ökonometria, a rendszerdinamika és a különböző versenystratégiai keretrendszerek.

A közgazdászok által széles körben használt ökonometriai technikák a különböző független tényezők és az érdeklődésre számot tartó eredmények közötti empirikus, ideális esetben oksági összefüggések feltárására irányulnak, mint például a szolgáltatás minőségének vagy a költségtendenciáknak a függvényében kialakuló elfogadási magatartás, a szabályozási kezdeményezések függvényében kialakuló árképzési reakciók stb. Az ökonometriában a kutatók a közgazdasági elméletet használják fel arra, hogy a regressziós eredményekre korlátozásokat alkalmazzanak, hogy megkönnyítsék az értelmes eredmények kinyerését a (gyakran) ritka adathalmazokból (pl. határár- vagy egyensúlyi feltételezések előírása). A legtöbb ökonometriai módszer a TEA-modellekhez hasonlóan részleges egyensúlyi elemzések, amennyiben feltételezik, hogy a modell külső tényezői állandóak. E korlátok enyhítésére a közgazdászok több gazdasági ágazat nagyméretű makrogazdasági modelljeit is megalkották, hogy megbecsüljék a különböző ösztönzők közvetlen és közvetett gazdasági hatásait. Az egyik legfontosabb megközelítés a számítógépes általános egyensúlyi (CGE) modellek fejlesztésére összpontosít, amelyek olyan elméletet integrálnak, amely megkönnyíti a valós gazdasági rendszerekben a változásokra válaszul fellépő visszacsatolási ciklusok figyelembevételét, azzal a céllal, hogy az ágazatspecifikus, részleges hatások helyett a teljes hatások becslését tegyék lehetővé.²

A rendszerdinamikai modellek egy újabb stratégiát kínálnak a több, egymással kölcsönhatásban álló komponensből álló komplex rendszerek viselkedésének modellezésére.³ Ezek a modellek gyakran differenciálegyenletek gyűjteményéből épülnek fel, amelyek jellemzik az érdeklődésre számot tartó változók alakulását és a visszacsatolási hurkokon keresztül más érdeklődésre számot tartó változókkal való kapcsolatukat. Ezek a modellek számos elemzési területen, többek között a távközlésben is alkalmazhatók, és hasznosnak bizonyultak az iparág szerkezetében idővel bekövetkező változások modellezésében és bizonyos beavatkozások hatásának szimulálásában.

A fent ismertetett kvantitatív modellezési technikákon kívül az üzleti iskolák számos elemzési keretrendszert tanítanak, és a vezetési tanácsadó cégek számos elemzési keretrendszert alkalmaznak, amelyeket a vezetők az üzleti stratégiák hatékonyságának és a versenydinamikának az értékelésére használnak a termék-, a termék- és a versenyhelyzetben.

² A CGE-modelleket széles körben alkalmazzák a kereskedelmi és adópolitikák hatásainak

értékelésére. A CGE-forrásokra mutató hivatkozásokért lásd: <https://www.gov.scot/publications/cge-modelling-introduction/> (látogatás 2021. 5. 8.). A CGE alkalmazása az USA gazdaságára (Dixon and Rimmer, 2010).

³ Lásd Duggan (2008) a rendszerdinamikai modellek használatának magas szintű áttekintését és Pagani (2008) a cellás rendszerekre való alkalmazását (Duggan, 2008; Pagani és Fine, 2008).

piacok és ipari ellátási vagy értékláncok. Példaként említhetjük Michael Porter 5-tényezős modelljét és különböző alternatíváit.⁴ Ezek a módszerek jellemzően inkább kvalitatív, mint kvantitatív jellegűek, és a különböző tényezők súlyozott értékelését eredményezik.

Mindezek a különböző modellezési megközelítések szerepet játszanak a vezetékek nélküli ágazathoz kapcsolódó beruházásokkal, versenysztratégiákkal, vásárlási döntésekkel és szakpolitikákkal kapcsolatos döntéshozatalban részt vevő érdekelték tájékoztatásában. Gyakran előfordul, hogy az egyik modell becslései és eredményei hasznosnak bizonyulhatnak más modellezési megközelítések számára, hogy inputokat szolgáltatassanak vagy keresztellenőrzési eredményeket nyújtsanak. Például a pénzügyi értékelési gyakorlatok során a kutatók jellemzően többféle technikát használnak, beleértve az NPV modellezést, a számviteli arányelemzéseket és a más piaci tranzakciókkal való összehasonlítást. Így, bár itt a kutatási modelltípusok egy alosztályára összpontosítunk, hasznos szem előtt tartani más megközelítéseket is, amelyek különböző kontextusokban hasznosak lehetnek.

Végül a mesterséges intelligencia (AI) szoftveralkalmazások, és különösen a gépi tanulási (ML) rendszerek térhódítása jelentős hatással van az empirikus elemzésekre és a döntéshozatalra a legtöbb területen, beleértve a techno-gazdaságtant is. Már most, és még inkább a jövőben, arra számítunk, hogy az ML és más mesterséges intelligencia alkalmazások, valamint a nagy, gyakran strukturálatlan adathalmazok, amelyekre az ML algoritmusokat alkalmazzák, nagyobb szerepet fognak játszani az empirikus modellezési tanulmányokban.⁵

4. Az 5G műszaki-gazdasági értékelésének felülvizsgálata

Az 5G műszaki-gazdasági értékeléssel kapcsolatos kutatások áttekintése érdekében a neves folyóiratokban és konferenciákon 70közöttelt vagy bemutatott tanulmányok kiválasztásával kezdünk.⁶ A tanulmányok mintájának összegyűjtéséhez a Google Scholar és a releváns terminológiát (például "techno-gazdasági", "5G", "költés" stb.) tartalmazó keresőkifejezéseket használtuk. E keresések eredményeit kézzel bányásztuk ki a fontos tanulmányok közül (figyelmet fordítva a szerzőkre, az idézési hivatkozásokra és a fókuszra). A Google Scholar "cited by" funkciójának használatával bevontuk a keresési eredmények áttekintése során azonosított releváns cikkeket, valamint azokat a cikkeket, amelyek a legtöbbet hivatkozott 5G műszaki-gazdasági értékelésekre hivatkoztak. Kizártuk azokat az írásokat, amelyek (i) nem feleltek meg a magas színvonalú tudományos szabványoknak, (ii) csak minőségileg szóltak az 5G műszaki-gazdasági értékeléséről, (iii) nem volt egyértelműen szakfolyóirat vagy konferencia bizottság által lektorált, és (iv) ha a PhD előtti eredmények voltak (pl. a mesterdolgozatokat kizártuk).

Az 5G TEA-tanulmányok elemzése nyolc kulcsfontosságú témára összpontosít, amelyek lefedik az 5G műszaki-gazdasági értékelések e vizsgálatához azonosított kulcsfontosságú szempontjait, amint azt a 2. ábra szemlélteti. Ezek mindegyikével a következő alfejezetekben foglalkozunk. Emellett áttekintésünk kitér arra, hogy a szakirodalom hogyan illeszkedik a nyílt tudományos menetrendhez, az üzleti modellek értékelésére, a meglévő tanulmányok területi fókuszára (pl. városi vs. vidéki) és az 5G techno-gazdasági eredmények vizualizálására használt technikákra.

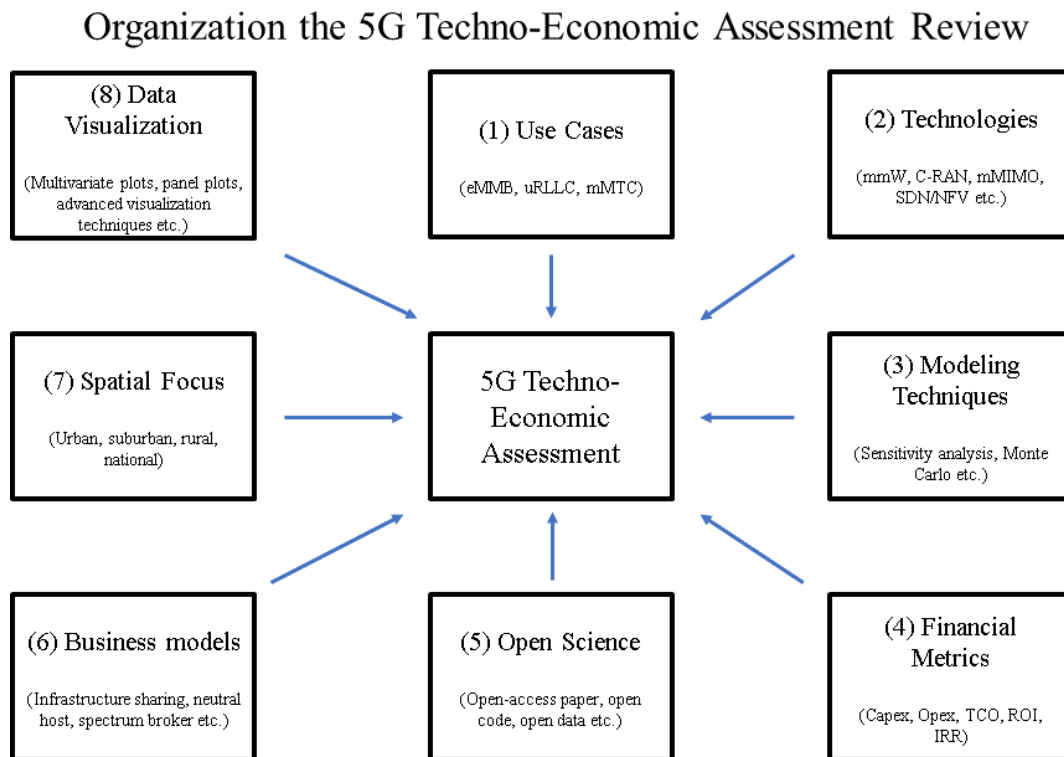
⁴ A vezetékes tanácsadók számos keretrendszert javasoltak, amelyek közül Porter (1980) a példaértékű (Porter, 1980).

⁵ Például annak megvitatására, hogy a mesterséges intelligencia várhatóan hogyan befolyásolja a gazdasági kutatást és az ökonometriát, lásd (Athey, 2019; Varian, 2014).

⁶ Mivel számos, a vezetékek nélküli technológiáról, különösen az 5G-ről szóló, szakmailag lektorált tanulmányt írtunk, jól ismerjük a szakirodalmat ezen a területen. A nemzetközi konferenciákon

bemutatott 5G-s dolgozatok száma, amelyeket be lehetne vonni, általában véve elég nagy, több mint ezer. Az itt elemzett dolgozatok szelektívebb, és ezért szubjektívebb kiválasztása azonban a "techno-gazdasági" szigorú meghatározására támaszkodik, amelyre kevesebb, mint neves100 dolgozat létezik.

Ábra Az 5G műszaki-gazdasági értékelés nyolc fő témájának meghatározása2



4.1. Felhasználási esetek

Az 5G korábban tárgyalt három fő felhasználási esete közül a műszaki-gazdasági értékelési szakirodalom nagy része az eMBB-re összpontosít, és csak kis számban értékeli az uRLLC-t, és gyakorlatilag egyik sem összpontosít az mMTC-re. Ez nagyrészt annak köszönhető, hogy a 3GPP Release elsősorban az eMBB-re összpontosít¹⁵. Az uRLLC és az mMTC képességeinek lehetővé tétele a 3GPP jövőbeli szabványainak véglegesítésétől függ, beleértve a 16. és 17. kiadást is. Ezeket a felhasználási eseteket vitathatóan a későbbi szabványosításra hagyták, mivel további innovációra és fejlesztésre van szükség az új, összehangolt rendszer topológiák lehetővé tételéhez, a megbízható hozzáférést biztosító többszörös rádiós hozzáférési technológiától kezdve az intelligens forgalomirányításig (Ilderem, 2020).

Az eMBB szolgáltatását gyakran hasonlítják össze a meglévő 4G LTE és LTE-Advanced lehetőségekkel a műszaki-gazdasági értékelés segítségével. Az elemzések gyakran arra összpontosítanak, hogy összehasonlítsák e technológiák használatának költséghatékonyságát az 5G-ben rendelkezésre álló újabb technológiákkal, például milliméterhullámon keresztül (Kusuma és Suryanegara, 2019) vagy ultrasűrű HetNets kissejtréteget használva (Oughton és Russell, 2020a), akár beltérben (Neokosmidis és mtsai., 2019; Paglierani és mtsai., 2019), akár kültéren (Bouras és mtsai., 2017; Oughton és Frias, 2018). E munkák közül sok az 5G szabványosítása után jelent meg a szakmailag lektorált szakirodalomban a kiadásban, szemben¹⁵, a korábbi munkákkal, amelyek a szabványosítás előtt, kb. 2014-től kezdődően történtek (Nikolij és Janevski, 2015; Oughton és Frias, 2016; Yunas et al., 2014). Bizonyára a később megjelent munkák vitathatatlanul részletesebbek és szigorúbbak, mivel egyértelműbb volt, hogy mely technológiák fognak bekerülni az 5G-be, ami megkönnyítette a lehetséges műszaki-gazdasági hatások és az eMBB által a hálózatüzemeltetők számára jelenthető üzleti esetek típusainak értékelését (Rendon Schneir et al., 2019).

Megkezdődött a rendkívül megbízható, alacsony késleltetésű kommunikációt (uRLLC) célzó felhasználási esetek értékelése, amely az 5G egyik legfontosabb jellemzője, és amely eddig sokkal kevesebb figyelmet kapott, mint az eMBB. Az 5G felhasználási esetek által megcélzott késleltetés biztosítása azonban még mindig nagy kihívást jelent, különösen, ha ezt költséghatékony módon próbáljuk megvalósítani a késleltetésre érzékeny, kritikus küldetés-kritikus környezetekben (Lema et al., 2017). Ezért alapvető fontosságú az infrastruktúra kiépítésének költséghatékony optimalizálásának képessége, hogy minimalizálni lehessen az esetleges késedelmeket a szolgáltatásban anélkül, hogy a hálózati architektúrát annyira túlméretezetté tennénk, hogy bármely konfiguráció gazdaságilag nem lenne életképes (Santoyo-González és Cervelló-Pastor, 2018). Az egyik remény az, hogy a COTS (Commercial Off The Shelf) feldolgozó hardverek felhasználásával a szállítási költségek csökkenthetők a nagy berendezésgyártók hagyományos, szabadalmaztatott technológiáinak alkalmazásához képest (Marotta et al., 2018). A jelenlegi kihívás a jövőre nézve az, hogy képesek legyünk olyan modelleket kidolgozni, amelyek képesek optimalizálni a hálózati késleltetési időt a különböző forgalmi terhelésekhez, tekintettel a heterogén felhasználói berendezések (UE) mintázataiból adódó, a nap folyamán megjelenő térbeli és időbeli mintázatokra (Basu et al., 2021).

A szakirodalomban még mindig vita folyik arról, hogy a következő generációs mobilgenerációk (pl. 5G és 6G) monetarizálásának fő módja az ember által irányított szolgáltatások (Dang et al., 2020) vagy a gép által irányított szolgáltatások (Suryanegara, 2018) lesznek-e a fő módja. Gyakran a tömeges géptípusú kommunikáció (mMTC) felhasználási esetet "Massive Internet of Things" (MIoT) néven is említik, de mindegyik kifejezés arra utal, hogy a 3GPP 13. kiadása által támogatott, alapvetőbb Narrow Band IoT (NB-IoT) szabványon túl a gépi használatot támogató, széles körű lefedettségű cellás szolgáltatásokra van szükség (Martín et al., 2019). Végül soron ezek a gépek lehetnek helyhez kötött érzékelők, például intelligens mérőórák (Hidayati et al., 2019) vagy más mozgó tárgyakon (vagy akár élő állatokon) elhelyezett eszközök, például mezőgazdasági felhasználásra (Vannieuwenborg et al., 2017). A techno-gazdasági megközelítéssel végzett használati esetelemzés azt sugallja, hogy a cellás IoT-hálózatok pusztán egyetlen használati esetre történő tervezése gazdaságilag nem életképes, mivel ez a stratégia rossz költséghatékonyssággal jár, ami alátámasztja a vertikális ágazatokban a több különböző felhasználási célra történő forgalomaggregáció szükségességét (Hossain és Markendahl, 2021).

4.2. Technológiák

Ez a dokumentum már azonosította az 5G fő technológiai trendjeit, mint a hálózat sűrűsödése, a milliméteres hullám, a masszív MIMO és a virtualizációs mozgalom, amely az SDN/NFV felhőfeldolgozásra terjed ki.

A hálózatsűrítés célja a rendszer kapacitásának tömeges növelése a nagyobb frekvenciasáv szélességű újrafelhasználásnak köszönhetően, gyakran többszintű hálózatok alkalmazásával, ahol a makrocellák a nagy területű lefedettségre összpontosítanak, a kisebb cellák pedig hotspot-kapacitást biztosítanak a nagyon nagy forgalmi igényű területeken (Shah et al., 2019). A hálózatsűrítés műszaki-gazdasági költségeit Hollandiában vizsgálják, számszerűsítve mind a potenciálisan szükséges keresletet, mind a kínálati oldali stratégiák ebből következő költségeit a forgalmi terhelés kielégítése során (Oughton et al., 2019a). A különböző sűrítési lehetőségek a kiscella réteg önálló telepítésére vagy a kis- és makrocellák HetNet-konfigurációban történő kombinált telepítésére összpontosítanak. Ezen túlmenően a techno-gazdasági makrocellás sűrítést nyolc alacsony és közepes jövedelmű ország (LMIC) esetében részletesen vizsgálják, az 5G stratégiák és a meglévő 4G opciók összehasonlítására összpontosítva (Oughton et al., 2021). Tekintettel a RAN-eszközök megnövekedett számára,

egy ilyen architektúra természetesen kérdéseket vet fel a backhaul szállítási lehetőségekkel kapcsolatban, a techno-gazdasági elemzés az idő- és hullámhosszosztásos multiplexelt passzív optikai hálózatok költségminimalizálására összpontosított.

(TWDM-PON) (Chen et al., 2016), valamint a vezeték nélküli backhaul technológiák (Yaghoubi et al., 2018), különösen a milliméterhullámú hálós hálózatok (Magne et al., 2018) használatával.

Kétségtelen, hogy a milliméteres hullámfrekvenciák (~30-300 GHz) integrálása az 5G-be jelentős újdonság, de ez azt is jelenti, hogy e sávok eltérő terjedési jellemzői (nagyobb terjedési veszteségek tárgyakon keresztül, valamint nagy eső és légköri abszorpció, ami rövidebb cellatávolságot eredményez) új architektúrákat és telepítési forgatókönyveket eredményeznek (Luong et al., 2018), ezért új műszaki-gazdasági elemzést igényel annak megértéséhez, hogy a fizikai korlátok hogyan befolyásolják a telepítés gazdaságosságát. Például a cellák hatótávolsága valószínűleg 300 méter alatt lesz (Oughton et al., 2019b).

A milliméteres hullámspektrumot gyakran használják kis (pico) cellák, amelyek egyenként kevésbe kerülnek egy teljes makrocellás telephelyhez képest (pl. 7900 USD). A hálózat méretezése után azonban ez az opció az ilyen frekvenciák rossz terjedési jellemzői miatt kilométerenként¹² majdnem egységnyi 800 helyet igényelhet, ami összességében rendkívül drágává teszi az opciót (Smail és Weijia, 2017). Az ilyen megállapítások nem egyetlen tanulmányra korlátozódnak. A középsávós spektrumhoz (pl. 3,5 GHz) képest a műszaki-gazdasági elemzések azt mutatják, hogy a milliméterhullámok kiépítése lényegesen költségesebb (Bouras et al., 2020). A szakirodalomban más tanulmányok rámutatnak arra, hogy a milliméterhullámú spektrum kültéri telepítés esetén hatalmas kapacitásnövekedést (>100 Gbps/km²) képes biztosítani. A 4G LTE-hez képest 100-szoros kapacitásnövekedést biztosító hálózat biztosításához azonban a szükséges beruházás 4-5-ször nagyobb (pl. a garantált 100 Mbps/felhasználó biztosításához) (Wisely et al., 2018). Az, hogy az 5G több vagy kevesebb költséggel jár-e, mint a korábbi generációk, nagyban függ a probléma felállításának módjától, valamint attól, hogy milyen szolgáltatásminőségi szintet kíván egy üzemeltető életképesen telepíteni a felhasználók számára, bár ez a szakirodalom különböző tanulmányaiban ritkán egységesített (Jha és Saha, 2018).

A masszív MIMO-architektúra kulcsfontosságú technológia, amely már széles körben elterjedt azokban az országokban, ahol az 5G aktívan kiépül. Azáltal, hogy a Massive-MIMO a többutas terjedésnek köszönhetően sokkal nagyobb spektrális hatékonyságot biztosít, az egy bitnyi átvitt információ költsége jelentősen csökkenthető (amire a forgalom exponenciális növekedése miatt nagy szükség van). Az energiafogyasztás szintén fontos költségtényező, amelyet a Massive-MIMO HetNet telepítéseknél figyelembe kell venni (Liu et al., 2015). A Massive-MIMO-ra vonatkozóan elvégzett elemzésekből például az eredmények azt mutatják, hogy az antennák számát viszonylag alacsonyan kell tartani (pl. 16T16R vagy 32T32R), hogy a technológia telepítésének TCO-ja életképes maradjon, különben az energiafogyasztásból származó működési kiadások olyan szintre emelkedhetnek, amely gazdaságilag nem életképes (I. A. Gedel és Nwulu, 2021). Ilyen megállapításokat máshol is azonosítottak a techno-gazdasági szakirodalomban, ahol a magasabb és magasabb rendű MIMO fenntarthatatlan szintű energiaigényhez vezet (ami negatív környezeti hatásokkal is járhat, amennyiben ez az energia környezetileg nem kedvezőtlen fosszilis tüzelőanyagokból származik) (Luong et al., 2018).

A virtualizált hálózatokra való áttérést a potenciális költségmegtakarítás hajtja, de ez csak a forgalmi igényből eredő hálózati terhelés és a feldolgozáshoz szükséges adatközpont-erőforrások közötti kompromisszum kiegyensúlyozásával érhető el (Basta et al., 2017). A COTS-eszközök használata a gyártóspecifikus berendezések helyett költséghatékonysági megtakarítást eredményezhet, de az SDN- és NFV-vezérlőknek otthont adó adatközpontokban a hálózati erőforrások kezelése fontos lesz a szolgáltatásminőség és az adatfeldolgozásból eredő költségek (pl. energiaigény) közötti egyensúly megteremtése szempontjából, ami rávilágít e probléma műszaki-gazdasági elemzésének szükségességére. A virtualizáláshoz szükséges adatfeldolgozó létesítmények elhelyezkedése valóban kihívást

jelent mind a hálózatüzemeltetők által telepített nagy kiterjedésű hálózatok, mind pedig az általánosan telepíthető magán 5G-hálózatok számára.

beltéri (Neokosmidis et al., 2019; Paglierani et al., 2019). A virtualizált hálózati architektúrák a teljes költség akár 75%-át is megtakaríthatják a hagyományos típusokhoz képest, meghatározott hálózati késleltetési idők és forgalmi terhelések esetén (Basu et al., 2021). A késleltetési kritériumok azonban rendkívül fontosak, ami azt jelenti, hogy a feldolgozó létesítmények földrajzi elhelyezkedése sokkal fontosabb szerepet kezd játszani, mint a korábbi hálózati architektúrákban (Santoyo-González és Cervelló-Pastor, 2018). A műszaki-gazdasági értékelés azt sugallja, hogy bár a virtualizáció 29%-os megtérülést eredményezhet, így bármely beruházás megtérülése akár egy év is lehet, számos bizonytalansági tényező kisziklathatja ezeket az eredményeket, a negatív kockázatok közé tartoznak az ismeretlen bevételi, forgalmi és költségnövekedési tényezők (Rendon Schneir et al., 2019).

4.3. Modellezési technikák

Az 5G technológiák és kiépítési stratégiák műszaki-gazdasági hatásainak értékelésére számos kulcsfontosságú modellezési technikát alkalmaznak, amelyek közül sok a bizonytalansági számszerűsítésre összpontosít.

Az optimalizálás egy adott problémára a lehető legjobb megoldás azonosításának képessége. E megközelítés alkalmazása különösen kedvelt a hálózattervezési szakirodalomban, amelynek célja a RAN (Bondarenko et al., 2019; Haile et al., 2020; Ouamri et al., 2020), a backhaul (Chen et al., 2016; Ge et al., 2019) és a maghálózati architektúrák (Basta et al., 2017) optimalizálása. Tekintettel a fogyasztók számára megfizethető 5G-szolgáltatások értékesítésének ebből következő kihívásaira és a profitmaximalizálásra való törekvésre, az optimalizálás alkalmazása a techno-gazdasági modellekhez az 5G-árképzési tanulmányokban is teret nyert (Sevastianov és Vasilyev, 2018). Például az olyan 5G funkciók, mint a hálózati szeletelés, a nyereség optimalizálása érdekében rugalmas és hatékony hálózatszervezési és erőforrás-gazdálkodási keretet igényelnek, de hogy ez a gyakorlatban hogyan valósul meg, azt még számos hálózatüzemeltető és elemző dolgozza ki (Han et al., 2017).

Bár a kommunikációs hálózatok műszaki-gazdasági értékelésében gyakoriak az optimalizálási megközelítések, aggodalomra ad okot, hogy a kidolgozott modellek szerkezetében rejlő bizonytalanságok gyakran nem jelennek meg, és az elemzők vagy lebecsülik, vagy teljesen figyelmen kívül hagyják ezt a szempontot. Ez a probléma nem feltétlenül korlátozódik a híradástechnika területére, de azáltal, hogy nem foglalkoznak ezekkel a szempontokkal, a modellel kapcsolatos fontos információk nem kerülnek a döntéshozók elé, ami azt jelenti, hogy a műszaki-gazdasági modell meglátásai korlátozottak, nem elég robusztusak vagy félrevezetőek lehetnek (Yue et al., 2018).

Az érzékenységi elemzés olyan bizonytalansági számszerűsítési technikaként definiálható, amely annak feltárására használható, hogy az egyes kimeneti változók hogyan változnak a bemeneti változók ismételt változtatásával. A kulcsfontosságú kimeneti mérőszámokban bekövetkező változás mérésének folyamata függhet akár korlátozott számú növekményes értéktől, vagy ideális esetben egy teljes Monte Carlo-elemzés alkalmazásával, amely folyamatos eloszlásokat használ. Például az 5G közlekedési hálózatok műszaki-gazdasági modelljének segítségével a TCO érzékenységét vizsgálják az energiaárak, az antennaárak, a lízingárak és a rendelkezésre álló újrafelhasználható polgári infrastruktúra mennyiségének függvényében (Yaghoubi et al., 2019, 2018). Szintén gyakori a kulcsfontosságú rádiótechnikai paraméterek érzékenységi elemzésének bevonása, például i. az árnyékolásból és a falak behatolásából eredő terjedési veszteségek (Wisely et al., 2018), vagy ii. az 5G hálózatok azon képessége, hogy a forgalmi igény csökkentése érdekében a tartalmakat gyorsítótárba helyezték (Chiha et al., 2021). Egyes tanulmányok az 5G kiépítését befolyásoló kulcsfontosságú szakpolitikai paraméterek, például a teljes spektrumköltség érzékenységi elemzését is tartalmazzák (Oughton és Jha, 2021).

A forgatókönyv-elemzést olyan technikaként határozzák meg, amely a stratégiai tervezéshez használható, például úgy, hogy egy kidolgozott mennyiségi modellt meghatározott inputok értelmes halmazának vetnek alá.

paraméterek, hogy olyan elemzések készülhessenek, amelyek tájékoztatják a döntéshozókat. A forgatókönyvek olyan fontos dimenziók megragadására szolgálnak, mint a potenciális felhasználók jövőbeli populációja, az elfogadás mértéke és a forgalom jövőbeli növekedése (Oughton et al., 2018). Az ilyen megközelítést gyakran alkalmazzák, amikor nincs elegendő tudományos információ egy műszaki-gazdasági modell helyes paraméterezéséhez. Ezért a forgatókönyvek jól alkalmazhatók a hálózati kereslet különböző jövőképeinek hasznos ábrázolására, mivel ez végső soron ismeretlen paraméter, amikor a hálózatüzemeltetők jelentős döntéseket hoznak egy új generációs cellatechnológia, például az 5G bevezetésének módjáról. A 3GPP szakirodalom nagy részében a "forgatókönyv" kifejezést különböző telepítési helyzetek, például a "sűrű városi", "városi makro" vagy "vidéki" helyzetek ábrázolására használják, és ezek a kifejezések gyakran irányítják a kutatók által a különböző 5G telepítési lehetőségek értékelésére használt műszaki-gazdasági forgatókönyveket (Jha és Saha, 2018).

4.4. Pénzügyi mutatók

Amint az 1. ábrán látható, a műszaki-gazdasági értékelés kulcsfontosságú része a mérnöki eszközök pénzügyi költségmutatókká történő átalakítása, hogy betekintést nyerjünk a különböző döntések gazdasági következményeibe. A szakirodalomban azonban vegyes a megítélés, hogy ezt milyen sikerrel végzik. Például az egyik legjobban használható pénzügyi költségmetrika a TCO, amely a tőkeköltségek és az üzemeltetési költségek kombinációját jelenti egy adott időszak alatt, amely a legjobban kapcsolódik az eszköz élettartamához (vagy a cellákban a generációs korszerűsítéshez, amely általában évtizedes alapon történik). Sajnos nem minden tanulmány tartalmazza ténylegesen az Opexet, ehelyett pusztán a Capexre összpontosít (Araújo et al., 2018; Arévalo et al., 2018; Chen et al., 2016; Gangopadhyay et al., 2019; Pavon-Marino et al., 2020). Az ilyen megközelítés nem csupán a képnek csak egy részét adja ki, ami nem hatékony döntéshozatalhoz vezethet, de ezt a problémát súlyosbítja az 5G költségszerkezetének általános eltolódása a "Bármi mint szolgáltatás" irányába. Például a hálózatüzemeltetők számára az előzetes költségek csökkentésének egyik módja az, hogy harmadik féltől bérelnek berendezéseket és szolgáltatásokat, ahelyett, hogy saját eszközök építésébe fektetnének be a kívánt szolgáltatások nyújtásához. Az üzleti modell struktúrájában bekövetkező változás azzal a hatással jár, hogy a hálózati beruházások, amelyek hagyományosan Capexként jelentkeztek, ha egy üzemeltető saját hálózatot épített, Opex-fizetéssé válnak, ha egy üzemeltető eszközt bérel. Ez jellemző a felhőalapú RAN-hálózatokra való átállással, ahol nem garantált, hogy a hálózatüzemeltetők saját adatfeldolgozó központokat építenek, ehelyett inkább a felhőalapú hálózatokban már versenylőnnyel rendelkező nagy szolgáltatók, például a Google, az Amazon vagy a Microsoft meglévő kapacitásait veszik igénybe.

Bár a csak a Capex-re vonatkozó számszerűsítés korlátozott megértést biztosít, számos olyan tanulmány is létezik, amely azt állítja, hogy a "költségekre" összpontosítanak a technogazdasági modellek felépítésével, de valójában megállnak a tényleges pénzügyi számok eredményeinek hozzárendelése előtt (Basta et al., 2017; Raza et al., 2015; Santoyo-González and Cervelló-Pastor, 2018). Igaz, a szükséges eszközszámok még mindig felhasználhatók a betekintés biztosítására, mivel a több eszköz erősen korrelál a magasabb költségekkel, de a kutatóknak saját költségkészleteket kell alkalmazniuk, ha egy adott elemzést akartak használni, hogy betekintést nyújtsanak egy műszaki-gazdasági 5G-problémába.

A Capex és Opex felhasználása mellett a TCO becsléséhez egyes tanulmányok a költségbecsléseket egy lépéssel továbbviszik a bevételek becslésével, hogy olyan hasznos mérőszámokat hozzanak létre, mint a RoI vagy az IRR (Ghoreishi et al., 2020; Haddaji et al., 2018; Neokosmidis et al., 2019; Paglierani et al., 2019; Rendon Schneir et al., 2019; Rianti et al., 2020; Smail and Weijia, 2017). Az iparban és a kormányzatban sokan előnyben részesíthetik azokat a mérőszámokat, amelyek mind a kínálati oldali költségeket, mind a

potenciális keresleti oldali bevételeket megragadják, azon az alapon, hogy a magas TCO nem jelenti azt, hogy egy hálózati stratégia életképtelen, ha a felhasználóknak magas a fizetési hajlandóságuk a szolgáltatásért, és fordítva.

Ezért rendkívül értékes, ha a különböző 5G hálózati stratégiák összehasonlító elemzése a potenciális pénzügyi megtérülésen alapuló beruházási mérőszámok segítségével történik.

4.5. Nyílt tudomány

A vezeték nélküli kommunikációs hálózatok tervezéséhez szükséges új tudományos felismerések kifejlesztéséhez olyan megbízható felfedezésekre van szükség, amelyeknél más kutatók bízhatnak a szakirodalomban közzétett következtetéseikben. Az elmúlt évtizedben azonban a tudományos kutatások reprodukálhatósága válságba került, és az olyan vezető folyóiratokban, mint a *Science*, megjelent, lektorált tanulmányok aggasztó arányban olyan eredményeket és következtetéseket hoztak, amelyeket más kutatók nem tudtak megismételni (McNutt, 2014). Például egy, a *Nature*-ben közzétett felmérésben a megkérdezett kutatók 90%-a (n=1576) azt állította, hogy reprodukálhatósági válság van, ahol a fizikában és a mérnöki tudományokban a kutatók közel 70%-a számolt be kudarcról, amikor megpróbálta reprodukálni egy másik kutató eredményeit (Baker, 2016). Ennek két legfőbb oka a következő: (i) a módszer és a kód nem áll rendelkezésre, és (ii) az eredeti kutatóktól nem áll rendelkezésre semmilyen nyers adat. Az ilyen problémák motiválják a téma felülvizsgálatát az 5G műszaki-gazdasági értékelésével kapcsolatban.

Az 5G-re vonatkozóan léteznek olyan műszaki-gazdasági értékelési modellek, amelyek a modellezési kódot nyílt forráskódúként adták ki. Ide tartoznak például az IEEE-ben megjelent tanulmányok, amelyek a nagyobb átláthatóság és reprodukálhatóság elősegítése érdekében az elemzéshez kapcsolódó kódbázis kiadását is választották (Oughton et al., 2019b; Oughton és Jha, 2021; Oughton és Russell, 2020a). Valamint azok az 5G műszaki-gazdasági kódbázisok, amelyeket speciális nyílt szoftveres folyóiratokban, például a *Journal of Open Source Software* című folyóiratban tettek közzé (Oughton és Russell, 2020b). Sajnos ez csak egy nagyon kis és korlátozott részét teszi ki a közzétett 5G techno-gazdasági modelleknek, ami arra utal, hogy ez a terület messze nem felel meg a legjobb tudományos gyakorlatnak. A jövőbeni, például a 6G-re vonatkozó műszaki-gazdasági kutatásoknak a forráskódot és az alapul szolgáló adatokat nyilvánosan közzé kellene tenniük, hogy más kutatók is megvizsgálhassák és validálhassák a kifejlesztett kódot. Egy ilyen megközelítés további előnye, hogy csökkenti az új vagy meglévő kutatások előtt álló belépési korlátokat a meglévő techno-gazdasági modellek feltárása, felhasználása és fejlesztése terén, és lehetővé teszi a különböző modellek teljesítményének összehasonlító összehasonlítását.

A tudományos számítástechnikára vonatkozó legjobb gyakorlati útmutatókat azért tették közzé, hogy segítsék a kutatókat, és fokozzák a megbízható kutatási protokollok általános betartását (Wilson et al., 2017, 2014). Ez kiterjed az adatkezelésre, a szoftverekre, az együttműködésre, a projekt megszervezésére, a változások nyomon követésére és a kéziratokra. Ideális esetben például az előállított szoftveres kutatási kódbázist egység- és integrációs szoftverteszttekkel együtt kell kiadni, hogy biztosak lehessünk abban, hogy egy techno-gazdasági modell azt teszi, amit a modellnek tennie kell. Dokumentációt is ki kell adni, hogy az új felhasználók számára segítsen megérteni, hogyan illeszkedik egymáshoz modulról modulra az 5G műszaki-gazdasági modell. A hírközlési mérnököknek jobban be kell tartaniuk ezeket a bevált gyakorlati szabványokat a műszaki-gazdasági értékelési kutatások minőségének javítása érdekében.

A TEA-modellek eredendő összetettsége és a vezeték nélküli hálózatokkal és szolgáltatásokkal kapcsolatos döntéshozatali problémák miatt, amelyekről ezek a modellek tájékoztatni kívánnak, a megfelelő átláthatóság hiánya miatt az eredmények gyakorlati értéke csekély, mivel a modell készítőin kívül szinte lehetetlen, hogy bárki más megértse a modell legfontosabb feltételezéseit, érzékenységét, és így megbízzon az eredményekben.

4.6. Üzleti modellek

Jelentős kutatási terület alakult ki az 5G üzleti modelljei és az ebből következő műszaki-gazdasági következmények körül. Ennek háttérében az áll, hogy számos mobilpiacon a bevételek stagnálnak és/vagy csökkennek, ami kihívás elé állítja a gazdasági feltételeket a hálózatüzemeltetők számára, akiknek nagy összegeket kell befektetniük az 5G-szolgáltatások nyújtásához.

Számos új üzleti modell létezik, amely segíthet a költségek csökkentésében. Először is, jelentős számú tanulmány foglalkozott az infrastruktúra megosztásának költségcsökkentő előnyeivel, tekintettel a lehetséges megosztás különböző típusaira (passzív vagy aktív megosztás, illetve földrajzi megosztás, például közös vidéki hálózat) (Oughton et al., 2021). Az elemzések azt sugallják, hogy az infrastruktúra megosztása előnyös lehet egy hálózatüzemeltető számára, még akkor is, ha az üzemeltető potenciálisan képes kiszorítani egy konkurens üzemeltetőt a piacról (Andrews et al., 2017). Az infrastruktúra megosztásával kapcsolatos értékelések nem feltétlenül csak a magas jövedelmű piacokra korlátozódnak (Oughton és Frias, 2018; Rendon Schneir et al., 2019), az értékelések a feltörekvő piacokon, például Ghánában a passzív megosztásra is összpontosítanak (I. Gedel és Nwulu, 2021).

Mivel a hálózati szeletelés az 5G egyik kulcsfontosságú fejlesztése, ez hatással van a jelenlegi és jövőbeli üzleti modellekre, amelyeket az üzemeltetők a kommunikációs szolgáltatások értékesítésére használnak. A szeletelési tulajdonságok, amelyeket egy üzemeltető a hálózatán fejleszt ki, hatással lesznek a potenciális kiadásokra és bevételekre, a kutatások e műszaki jellemzők következményeire összpontosítanak (Han et al., 2017) (ha egy üzemeltető egyáltalán úgy dönt, hogy saját hálózatot épít). Az egyik remény például az, hogy azáltal, hogy a vidéki hálózatüzemeltetők a hálózat egyetlen szeletét üzemeltetik, csökkenhetnek a kiépítés költségei, ami skálázhatóbb és életképebb üzleti modellt tesz lehetővé, amely remélhetőleg hosszú távon fenntarthatóbb, mint a jelenlegi megközelítések (Cavalcante et al., 2021). Így olyan helyzet alakul ki, amelyben egyszerre vannak infrastruktúra- és szolgáltatók, és egyikük sem feltétlenül nyújt egyszerre infrastruktúrát és szolgáltatást, hanem egy-egy területre specializálódik (Cano et al., 2019).

4.7. Térbeli fókusz

Számos műszaki-gazdasági értékelő dokumentum kifejezetten egy adott területi perspektívára összpontosít, legyen szó akár az 5G telepítéséről sűrű, rendkívül nagy forgalmi terhelésű városi helyszíneken, akár az 5G telepítésének következményeinek vizsgálatáról kihívást jelentő vidéki és távoli helyszíneken.

A városi területekre összpontosító különböző értékelések például az új eszközök virtualizált felhőrádiós hozzáférési hálózat (C-RAN) használatával történő telepítésének költségmegtakarítási előnyeit vizsgálják, London központi része az egyik esettanulmányi példa (Rendon Schneir et al., 2019). A sűrű városi területeken ez logikus módja az 5G hálózat kialakításának és üzemeltetésének, mivel a nagy forgalmi terhelés erős gazdaságosságot biztosít az üvegszál kiépítéshez, amelyre a távoli rádiófejekből a közös feldolgozó létesítménybe történő fronthaul-forgalomhoz van szükség (Arévalo et al., 2018). A 4G makrocellás telephelyek használatakor a hálózat kiépítésének költségei a növekvő forgalmi igény kielégítésére a fő oka annak, hogy olyan nagy az érdeklődés az 5G városi területeken történő kiépítése iránt, mivel ezek az új technológiák remélik, hogy csökkentik az egy bitnyi információátvitel költségét (Yunas et al., 2015). Az 5G NR által a spektrális hatékonyság javulása, valamint más új technológiák, mint például a Massive MIMO, az 5G lehetőségeket jól alkalmassá teszik a nagyon nagy népsűrűségű városokban történő telepítésre, ahogy azt Indonézia három nagyvárosi területén is vizsgálták (Kusuma és Suryanegara, 2019). Bár még a 4G-hez képest elért spektrális hatékonyságjavulás ellenére is körültekintő kiadásokra lesz

szükség a hálózatüzemeltetők részéről annak biztosítására, hogy jelentős kapacitás- és lefedettségjavulást lehessen elérni.

a korábbi generációkhoz képest anélkül, hogy az 5G költségei a cellás hírközlési szolgáltatások fogyasztói számára életképtelen szintre emelkednének (Wisely et al., 2018).

Ezzel szemben a vidéki területeket csak korlátozottan értékelték, ami meglepő, mivel a jelenleg internetkapcsolattal nem rendelkezők nagy része vidéken és távoli helyeken lakik. Jelenleg világszerte akár egymilliárd embernek sincs még mindig megfelelő szélessávú kapcsolata, ami egyértelműen indokolja, hogy a világ népességének ezt a részét (amely közel 50%-át teszi ki) megpróbáljuk csatlakoztatni. Igaz, ezek közül az emberek közül sokan olyan területeken élnek, ahol már van mobilszolgáltatás, és az akadályt a mobiltelefon használatának elfogadása jelentheti, de még mindig sokan vannak olyan "nem elérhető helyeken", amelyeket jelenleg nem fed le a mobilinfrastruktúra, és ezért nem nyújtanak életképes 4G vagy 5G szélessávú szolgáltatást. Gyakran az egyik fő kihívás az, hogy az 5G bevezethető lesz-e ezeken a területeken, ahol a jövedelmek nagyon alacsonyak, ami szerény átlagos egy felhasználóra jutó bevételt (ARPU) jelent. Ilyen körülmények között a hálózatüzemeltetők nem tudnak megfelelő üzleti érvet felállítani a kulcsfontosságú beruházásokhoz, tekintettel az 5G hálózat kiépítésének potenciálisan magas költségeire, különösen azokon a területeken, ahol az elektromos áramhoz való hozzáférés kihívást jelenthet, és a meglévő optikai szálas jelenléti pontok (PoP) sűrűsége alacsony (Chiaraviglio et al., 2017). Ez határozottan emellett szól, hogy több techno-gazdasági értékelési modellezésre van szükség, mivel ez a tevékenység segíthet a "digitális szakadék" csökkentésére alkalmas, költséghatékony stratégiák meghatározásában. Például olyan techno-gazdasági költség-összehasonlításokat végeznek, amelyek figyelembe vehetik az 5G kiépítésének beruházási igényeit a vezetékes szélessávú forgatókönyvekhez (például a Fiber-To-The-Premises) képest (Araújo et al., 2018). Mivel az 5G viszonylag kevés javulást nyújt a vidéki és távoli, nem csatlakoztatott polgárok kiszolgálásának elősegítése szempontjából, a jövőbeli 6G-kutatásoknak jobban kell azonosítaniuk a költséghatékony technológiákat a szabványosítás előtt, hogy a cellás technológiák következő generációja megoldja a globális lefedettség problémákat.

4.8. Adatvizualizáció

A szélesebb körű műszaki-gazdasági értékelési szakirodalom nagy hangsúlyt fektet az adatok vizualizálására és az eredményeknek a döntéshozók széles közönsége számára történő bemutatására. Egyes esetekben ez odáig megy, hogy a kidolgozott műszaki-gazdasági modellhez front-end eszközként még grafikus felhasználói felületet (GUI) is készítenek, bár az 5G műszaki-gazdasági értékelésnél ezt a megközelítést alig alkalmazzák.

Általánosságban elmondható, hogy a mérnöki tudományokban a színek, a méretarányok és más vizualizációs technikák kihasználása rendkívül fontos eszköz a tudományos eredmények közzétételében. Az 5G techno-gazdasági szakirodalomban azonban nagy minőségi különbségek vannak az eredmények közzétételének módjában.

A panel ábrák használata tömör módja annak, hogy több dimenziós információt mutassanak be rendezett módon, különösen akkor, ha a kutatók kihasználhatják a színhasználatot. A panelplotok például lehetővé teszik az összehasonlító költségelemzések bemutatását az 5G telepítési stratégiák különböző típusaira vonatkozóan, és különösen erőteljesek, ha a színhasználat egyidejűleg használható az 5G techno-gazdasági modell által becsült költségek összetételének vizualizálására (Udalcovs et al., 2020, 2018; Yaghoubi et al., 2018).

Egyes tanulmányok kördiagramokat használnak az 5G kiépítési stratégiák szerinti költségösszetétel bemutatására, de ennek a megközelítésnek az a hátránya, hogy csak a relatív arányokat lehet bemutatni (Bondarenko et al., 2019). A kördiagramok helyett kedvezőbb, ha a kutatók olyan grafikus technikákat használnak, amelyek képesek mind a relatív arányok,

mind a

16. oldal 31

a becsült eredmények abszolút értékei, például a vízésdiagramokkal, amelyek mindkét cél elérésére alkalmas technikát jelentenek.

Gyakran előfordul, hogy a kutatók előnyben részesítik az eredmények táblázatos bemutatását, de ez nagyobb kihívást jelent az adott elemzés olvasói számára, hogy értékeljék és megértsék a fő eredmények megállapításait (Araújo et al., 2018). Ideális esetben az eredményeket olyan módon vizualizálják, amely egyszerre mutatja be a becsült értékeket, miközben grafikus technikákat is alkalmaz az összehasonlító különbségek szemléltetésére.

Az adatvizualizációs technikák alkalmazásának elmulasztása nem von le a magas színvonalú elemzésből, de fontos, hogy az olvasók számára a lehető legkönnyebben érthetővé tegyék az eredményeket. Arra is szükség van, hogy a kutatók megfelelő tudományos narratívát alkossanak a kutatási téma és a talált eredmények körül, az adatvizualizáció pedig kiemelkedő fontosságú ennek sikeres elérésében a kvantitatív tudományokban.

5. Megbeszélés és következtetések

Miután áttekintettük az 5G TEA szakirodalmat az ábrán azonosított nyolc kulcsfontosságú elem szempontjából, 2. most rátérünk az áttekintésből levont magas szintű tanulságok összefoglalására.

Melyek a fő tendenciák az 5G értékelésre szolgáló műszaki-gazdasági módszerek használatában?

Az egyik legfontosabb megállapítás az, hogy az elvégzett 5G műszaki-gazdasági kutatások többsége egyetlen felhasználási esetre, a továbbfejlesztett mobil szélessávra (eMBB) összpontosított, míg viszonylag kevés olyan tanulmány van, amely akár az uRLLC, akár az mMTC felhasználási eseteket vizsgálja. Ez talán a 3GPP 15. kiadása által nyújtott biztonságot tükrözi, amely nagyrészt az eMBB 5G New Radio interfészen keresztül történő biztosítására összpontosított, akár Non-Standalone, akár Standalone megközelítéssel. Ez azonban a jövőben megváltozhat, mivel a 3GPP kiadványok és a tervek¹⁷ szerint az 5G-től elvárt funkciók közül sokkal többet tartalmaznak majd az alacsony késleltetési idejű kommunikáció (az uRLLC és az ipari IoT (az mMTC címszó alatt)) lehetővé tétele érdekében.

Általánosságban elmondható, hogy a négy fő 5G technológiai területen (hálózati sűrítés, milliméteres hullám, masszív MIMO és virtualizáció) az egyes témakörökkel foglalkozó kutatások meglehetősen széles skálán mozognak. Míg azonban a hálózatsűrítést az elmúlt évtizedben mind a makrocellák, mind a kis cellák esetében jól kutatták, a virtualizációval kapcsolatos techno-gazdasági kutatások nagy része csak az elmúlt néhány évben jelent meg, és nagyobb hangsúlyt kapott az SDN/NFV alkalmazása a C-RAN architektúrák lehetővé tételére. Ez gyakran a városi telepítési helyzetekre összpontosít, ahol a virtualizációval költségmegtakarítást lehet elérni, de több kutatásra van szükség a vidéki és távoli telepítési forgatókönyvek hatásainak megértéséhez.

Mi működött és mi nem az 5G értékelésre szolgáló módszerek alkalmazása során?

Ez az áttekintés a meglévő 5G szakirodalomban elterjedt kulcskérdéseket azonosítja.

Először is, egy tervezett kommunikációs rendszer szolgáltatásminősége nagyon drámai hatással van az 5G techno-gazdasági kutatás eredményeire, fő megállapításaira és üzeneteire. Például a cellás rendszerek hálózati méretezésénél használt feltételezések különösen fontosak az elemzés valószínűsíthető pontosságának és megbízhatóságának megállapítása szempontjából, de ezek a feltételezések gyakran eltemetve vannak a dokumentumban (pl. nem szerepelnek az összefoglalóban vagy a következtetésekben, amelyeken a kutatók először

keresnek, amikor egy dokumentumot felülvizsgálják).

17. oldal 31

Másodszor, az értelmes pénzügyi mérőszámok használata papíronként változik: egyesek kizárólag a tőkekiadásokra (Capex) összpontosítanak, például a hálózati berendezésekre történő kezdeti egyszeri beruházásokra, míg mások kizárólag a működési kiadásokra (Opex), például a különböző technológiák energiafogyasztására. A különböző 5G technológiák költséghatékonyságának és a tágabb értelemben vett 5G hálózat kiépítési stratégiák megértéséhez a kutatóknak meg kell ragadniuk a TCO-t egy meghatározott kiépítési időszak alatt, amely vagy az eszközök élettartamára vagy a generációs frissítési időszakokra (pl. évtizedes) vonatkozik. Ez azért fontos, mert az "Bármilyen szolgáltatás" felé történő folyamatos elmozdulás az 5G megvalósítása szempontjából kulcsfontosságú üzleti modellfejlődés, amely azonban a költségegyenletnek csak egy részének elszigetelt vizsgálata korlátozott (pl. a csak a beruházási költségekre vonatkozó elemzések). Egy másik fontos szempont, hogy sok tanulmány azt állítja, hogy a "költségekre" összpontosít, de nem mutatja be a különböző stratégiák lehetséges költségeit, hanem inkább csak becsléseket ad az eszközszámokról, ami csak részleges képet ad a különböző döntések üzleti hatásairól.

Harmadszor, számos különböző modellfeltárási módszer létezik, amelyeket az 5G hálózatok műszaki-gazdasági értékelésére alkalmaznak, beleértve az optimalizálást, az érzékenységelemzést és a forgatókönyv-elemzést. Az egyik leggyakoribb technika, amelyet a mérnökök a cellás hírközlő hálózatok értékelésére használnak, az optimalizálás, de azonosítjuk, hogy sok tanulmány nem mindig tartalmazza a kutatók által bemutatott modelleredmények érzékenységi elemzését. Mivel minden modell a legjobb esetben is a valóság közelítése, amely egyszerűsítő feltételezésekre támaszkodik, és mivel a bemeneti adatok gyorsan elavulhatnak vagy erősen kontextusfüggőek, fontos az érzékenységi eredmények bemutatása. Ha nem tárják fel és nem magyarázzák el megfelelően, hogy a modellezési eredmények hogyan függenek a kulcsfontosságú inputoktól és a modellezési döntésektől (kompromisszumok), akkor csak részleges elemzést kapunk, amelynek döntési értéke lényegesen kisebb a cellainvesztíciók vagy működési stratégiák tervezéséhez.

Végezetül, az 5G techno-gazdasági értékelésén dolgozó kutatók általában kevésbé elkötelezettek a bemeneti adatok, a kód és az eredmények nyílt megosztása iránt. Ez aggasztó tendencia, és azt mutatja, hogy ez a kutatási terület messze elmarad más tudományos területek mögött, ahol a nyílt kód benyújtása előfeltétele a legrangosabb tudományos folyóiratokban (pl. Science/Nature) való publikálásnak. A kutatóknak elég magabiztosnak kellene lenniük elemzéseikben ahhoz, hogy adataikat, kódjukat és eredményeiket más kutatók számára is nyíltan hozzáférhetővé tegyék, hogy lehetővé tegyék az eredmények nagyobb mértékű validálását, és csökkentsék a belépési korlátot más elemzők számára a különböző 5G műszaki-gazdasági modellek összehasonlító értékeléséhez. A 6G-jelölt technológiák értékelése során a kutatókat fel kell hatalmazni arra, hogy elemzésüket nyíltan hozzáférhetővé tegyék, hogy növeljék a legfontosabb megállapításokba vetett bizalmat, és javítsák a megbízhatóság szintjét a híradástechnika egészében.

Az 5G jelenlegi műszaki-gazdasági értékelésének egyik fő problémája az, hogy a munka definíció szerint multidiszciplináris, a mérnöki és a közgazdasági szempontokat egyaránt felöleli. Mivel két különálló területet kell kezelni, a kutatóknak meg kell osztaniuk a két területen végzett munkájuk idejét. A multidiszciplináris kutatás egyik veszélye, hogy azáltal, hogy egyszerre több területet is érint, az elemzés nem biztos, hogy megállja a helyét a csak egyetlen speciális kutatási területre összpontosító kutatók vizsgálatában. Ezért fontos, hogy a kutatók ügyeljenek arra, hogy elkerüljék az irreális modellezési egyszerűsítéseket, és hogy az 5G bármilyen műszaki-gazdasági értékelése a mérnöki és a közgazdasági szakembereket egyaránt kielégítse, hogy az elemzés hiteles fogadtatásra találjon.

Hogyan javítható e módszerek használata a jövőbeni Next-G szakpolitikai döntések (pl. 6G) támogatása érdekében?

18. oldal 31

A jövőbeni 6G műszaki-gazdasági értékelő dokumentumoknak sokkal egyértelműbben kell megfogalmazniuk az elemzés során alkalmazott szolgáltatásminőségi feltételezéseket, például a forgalmi keresletre, a túlfoglalási tényezőkre, a terjedési veszteségekre, a spektrális hatékonyságra stb. vonatkozóan. - olyan kulcsfontosságú változók, amelyekről a korábbi 5G tanulmányokban nem mindig számoltak be egyértelműen.

Ezt többek között az adatok, kódok és eredmények fokozott megosztásával lehet orvosolni, mivel ez ösztönzi a kutatókat az egymástól való tanulásra, megkönnyíti a becült eredmények validálását, és lehetővé teszi a cellás hálózatok különböző műszaki-gazdasági modelljeinek összehasonlító értékelését.

Szükség van arra is, hogy a 6G műszaki-gazdasági értékelései jobban összpontosítsanak a különböző technológiák TCO-jára, és ne csak a Capexre összpontosítsanak, amely nem ad teljes képet a költségekről. A vezeték nélküli kommunikáció ökoszisztémájának további bővülésével olyan világ felé haladunk, amelyben az üzleti modellek a szolgáltatásalapú költségstruktúrák irányába mozdulnak el, és az előzetes Capex-beruházások elkerülése a hálózati eszközök rugalmasabb szolgáltatásalapú bérbeadása javára történik, részben a spektrum és az infrastruktúra fokozott megosztásának igénye miatt.

A szélessávú kapcsolat kiépítése a vidéki és távoli helyeken már most a 6G egyik fontos céljaként jelenik meg. Az 5G kutatási, fejlesztési és szabványosítási folyamata kevésbé összpontosított a vidéki lefedettségi problémák megoldására, mint a városi és külvárosi helyszíneken lévő mobilhálózatok kapacitásának növelésére. Az 5G kritikusai ezt jelentős stratégiai hiányosságként emelték ki, és ehelyett azzal érveltek, hogy a kívánatos inkább a következetes és megbízható lefedettség, nem pedig az egy felhasználóra jutó egyre gyorsabb kapacitások lennének (Webb, 2016). Ez nem feltétlenül egy vagy-vagy kilátás, és a 6G-nek könnyen lehetnek kapacitásnövelő és lefedettség-növelő kutatási irányai is.

Ez a vita most a 6G-ben is egyre inkább előtérbe kerül, az új cellás rendszerek megfizethetősége a 6G-vel kapcsolatos állásfoglalások közös témája, azzal a céllal, hogy a világ népességének további ~50%-a, akik még nem csatlakoztak az internethez, életképes szélessávú szolgáltatásokat kapjon. Ebben a tekintetben az egyik legfontosabb megállapítás, hogy a mérnököknek nagyobb figyelmet kell fordítaniuk a 6G-technológiák megfizethetőségének vizsgálatára, legalábbis a 6G szabványosítás előtti szakaszban, különösen a vidéki és távoli helyszíneken. Ideális esetben a 6G-kutatásnak lesz egy olyan fő irányvonala, amelynek célja az alacsonyabb költségű cellatechnológiák kifejlesztése az ARPU-korlátozott helyeken történő telepítéshez, és a 6G-jelölt technológiák műszaki-gazdasági értékelése a műszaki mérnöki és informatikai kutatással egyidejűleg történik.

Végezetül, bár itt a hangsúly az 5G mobilhálózatok TEA-vizsgálatain volt, és azon, hogy ezek hogyan fejleszthetők a 6G mobilhálózatok kiépítésével kapcsolatos kihívások jobb kezelése érdekében, az egyre nagyobb teljesítményű vezeték nélküli hálózatok fejlődése kiegészítő műszaki, piaci és szabályozási fejlesztésekkel jár majd. Már rámutattunk a mesterséges intelligencia és az ML térnyerésére, mint olyan kulcsfontosságú technikai fejleményekre, amelyek jelentős hatással vannak a modellek felépítésére. Hasonlóképpen, a felhőalapú számítástechnika, az alkalmazás/készülék ökoszisztéma és az iparági ellátási láncok (pl. a globális digitális platformszolgáltatók felemelkedése) gyorsan fejlődő fejlődése megváltoztatja az mobilhálózat-üzemeltetők szerepét a vezeték nélküli ökoszisztémában. Bár túlzás lenne egy TEA-elemzésben megpróbálni figyelembe venni mindezeket a kölcsönhatásban lévő trendeket és visszacsatolási hurkokat, ezek az összetett dinamikák hangsúlyozzák annak fontosságát, hogy a TEA-kutatási eredményeken túlmenően más modellezési technikákat is alkalmazzunk a vezeték nélküli ökoszisztéma valamennyi érdekeltjének - az iparától a végfelhasználókon át a politikai döntéshozókig - jobb kollektív döntéshozatalának elősegítése érdekében. Az itt szereplő ajánlások hangsúlyozzák a

legfontosabb modellezési módszerek világos dokumentálásának és átláthatóvá tételének fontosságát.

19. oldal 31

a TEA-elemzésekben használt feltételezések hozzájárulnak ahhoz, hogy ez az értékes kutatási technika továbbra is eredményesen járuljon hozzá a következő generációs vezeték nélküli rendszerek tervezéséhez.

Köszönetnyilvánítás

Dr. Lehr szeretné elismerni, hogy ezt a munkát részben az Egyesült Államok Nemzeti Tudományok Alapítványa támogatta a 2037777 számú támogatás keretében.

Hivatkozások

- 3GPP, kiadás [2021.16WWW-dokumentum]. URL [h16https://www.3gpp.org/release-hozzaferes: 7.13.21](https://www.3gpp.org/release-hozzaferes-7.13.21).
- Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N., Next2016. Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE Communications Surveys Tutorials 18, 1617-1655. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
- Ahokangas, P., Matinmikko-Blue, M., Yrjölä, S., Hämmäinen, H., Platform2021. configuration for local and private 5G networks in complex industrial multi-stakeholder ecosystems. Távközlési politika 45,102128.<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102128>
- Alsharif, M.H., Nordin, R., 2017. Fejlődés az ötödik generációs (5G) vezeték nélküli hálózatok felé: A milliméterhullám, a masszív MIMO és a kis cellák telepítésének jelenlegi trendjei és kihívásai. Telecommun Syst 64, 617-637. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0195-x>.
- Al-Turjman, F., Ever, E., Zahmatkesh, H., 2019. Kis cellák a közelgő 5G / IoT-ben: Forgalmi modellezés és telepítési áttekintés. IEEE Communications Surveys Tutorials 21, 28-65. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2864779>.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2864779>.
- Andrews, M., Bradonjić, M., Saniee, I., 2017. Az infrastruktúra megosztásából származó előnyök számszerűsítése, in: Proceedings of the 12th Workshop on the Economics of Networks, Systems and Computation, NetEcon '17. Association for Computing Machinery, Cambridge, Massachusetts, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1145/3106723.3106734>. <https://doi.org/10.1145/3106723.3106734>
- Angelichinoski, M., Trillingsgaard, K.F., Popovski, P., A 2019.Statistical Learning Approach to Ultra-Reliable Low Latency Communication. IEEE Transactions on Communications 67, 5153-5166. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2907241>.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2907241>
- Araújo, M., Ekenberg, L., Confraria, J., 2018. Vidéki hálózatok költségeinek összehasonlítása az 5G (mobil) és az FTTx (vezetékes) forgatókönyvek között, in: 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Előadva az IEEE2018 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) konferencián, pp. 259-264. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580981>.
- Arévalo, G.V., Tipán, M., Gaudino, R., 2018. Technoökonómia az optikai fronthauling optimális telepítéséhez az 5G számára nagyvárosi területeken, in: 2018 Nemzetközi konferencia az átlátható optikai hálózatokról (ICTON). Előadva a 2018. évi 20. nemzetközi konferencián az átlátszó optikai hálózatokról (ICTON), pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473801>.
- Ashraf, S.A., Blasco, R., Do, H., Fodor, G., Zhang, C., Sun, W., Supporting2020. Vehicle-to-thing Services by 5G New Radio Release-16 Systems. IEEE Communications Standards Magazine 4, 26-32. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1900047>.
<https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1900047>.
- Athey, S., 2019. 21. A gépi tanulás hatása a közgazdaságtanra, in: The Economics of

Artificial Intelligence. University of Chicago Press, pp. 507-552.

20. oldal 31

- Avranas, A., Kountouris, M., Ciblat, P., 2018. Energia-késleltetés kompromisszum az ultramegbízható, alacsony késleltetésű kommunikációban újraküldéssel. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2475-248536., <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2874143>.
- Baker, M., 2016. Reprodukálhatósági válság. *Nature* 533, 353-66.
- Basar, E., Indexmodulációs 2016. technikák 5G vezeték nélküli hálózatokhoz. *IEEE Communications Magazine* 168-175. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7509396>
- Basta, A., Blenk, A., Hoffmann, K., Morper, H.J., Hoffmann, M., Kellerer, W., Towards 2017. a Cost Optimal Design for a 5G Mobile Core Network Based on SDN and NFV. *IEEE Transactions on Network and Service Management* 1061-107514., <https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2732505>.
<https://doi.org/10.1109/TNSM.2017.2732505>
- Basu, D., Sankara Rao, A., Ghosh, U., Datta, R., 2021. Techno-gazdasági vezérlő telepítési architektúra megvalósítása vSDN-képes 5G hálózatokhoz, in: *Adjunct Proceedings of the International 2021 Conference on Distributed Computing and Networking. Presented at the ICDCN '21: International Conference on Distributed Computing and Networking ACM 2021,, Nara Japan, pp. 49-55.* <https://doi.org/10.1145/3427477.3429991>.
- Berkeley, Techno-gazdasági 2021. elemzés [WWW-dokumentum]. ABPDU. URL <https://abpdu.lbl.gov/capabilities/techno-economic-analysis/> (hozzáférés: 8.6.21).
- Bhat, J.R., AlQahtani, S.A., 6G 2021. Ecosystem: A 6G rendszer: Jelenlegi helyzet és jövőbeli kilátások. *IEEE Access* 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054833>.
- Bogale, T.E., Le, L.B., Massive 2016. MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: A lehetséges előnyök és kihívások. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 64-7511., <https://doi.org/10.1109/MVT.2015.2496240>.
<https://doi.org/10.1109/MVT.2015.2496240>.
- Bondarenko, O., Ageyev, D., Mohammed, O., 2019. Optimization Model for 5G Network Planning, in: *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). Előadás az IEEE 2019 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), pp. 1-4.* <https://doi.org/10.1109/CADSM.2019.8779298>.
- Bouras, C., Kollia, A., Barolli, L., Amato, F., Moscato, F., Enokido, T., Takizawa, M., 2020. Techno-gazdasági elemzés az MMWave vs. középsávú spektrumról az 5G hálózatokban, in: *AINA. pp. 90-105.*
- Bouras, C., Kollia, A., Papazois, A., 2017. Sűrű telepítések és DAS az 5G-ben: Egy technogazdasági összehasonlítás. *Wireless Pers Commun* 1777-179794., <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3711-0>. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3711-0>
- Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G.Y., McCann, J.A., 2018. Moduláció és többszörös hozzáférés az 5G hálózatokhoz. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 629-64620., <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698>.
<https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698-646>.
- Cano, L., Carello, G., Cesana, M., Passacantando, M., Sansò, B., 2019. Az infrastruktúra és a szolgáltatók techno-gazdasági kölcsönhatásainak modellezése az 5G hálózatokban egy többszereplős vezető-követő játékkal. *IEEE Access* 162913-1629407., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951697>.
- Cavalcante, A., Marquezini, M., Mendes, L., Moreno, C., 5G 2021. for Remote Areas: Kihívások, lehetőségek és üzleti modellezés Brazília számára. *IEEE Access* PP, 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050742>.
- Cave, M., 2018. Mennyire zavaró az 5G? Távközlési politika, Az 5G hálózatok következményei: A mobilinnováció útjának egyengetése? 42, 653-658. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.05.005>

21. oldal 31

- Chahbar, M., Diaz, G., Dandoush, A., Cérin, C., Ghoumid, K., A 2021. Comprehensive Survey on the E2E 5G Network Slicing Model. *IEEE Transactions on Network and Service Management* 18, 49-62. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3044626>. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3044626>
- Chen, H., Li, Y., Bose, S.K., Shao, W., Xiang, L., Ma, Y., Shen, G., 2016. Költségminimalizált tervezés TWDM-PON-alapú 5G mobil backhaul hálózatokhoz. *J. Opt. Commun. Netw., JOCN* 8, B1-B11. <https://doi.org/10.1364/JOCN.8.0000B1>.
- Chen, L.-S., Chung, W.-H., Chen, I.-Y., Kuo, S.-Y., 2020. AMC egy BP-ANN sémával az 5G továbbfejlesztett mobil szélessávhoz. *IEEE Access* 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024726>.
- Cheng, X., Zhang, M., Wen, M., Yang, L., 2018. Indexmoduláció az 5G számára: törekvés arra, hogy kevesebbrel többet tegyünk. *IEEE Wireless Communications* 126-13225,. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1600355>. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1600355>
- Chiaraviglio, L., Blefari-Melazzi, N., Liu, W., Gutierrez, J.A., van de Beek, J., Birke, R., Chen, L., Idzikowski, F., Kilper, D., Monti, P., Bagula, A., Wu, J., 2017. Az 5G bevezetése a vidéki és alacsony jövedelmű területekre: Megvalósítható-e? *IEEE Communications Standards Magazine* 1, 50-57. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700023>. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2017.1700023>
- Chiha, A., Wee, M.V. der, Goratti, L., Colle, D., 2021. A fedélzeti összeköttetés műszaki-gazdasági elemzése integrált műholdas-5G hálózat segítségével. *International Journal of Satellite Communications and Networking* 39, 322-338. <https://doi.org/10.1002/sat.1386>. <https://doi.org/10.1002/sat.1386>
- Dang, S., Amin, O., Shihada, B., Alouini, M.-S., 2020. Milyen legyen a 6G? *Nat Electron* 3, 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
- De Ree, M., Mantas, G., Radwan, A., Mumtaz, S., Rodriguez, J., Otung, I.E., 2019. Kulcskezelés az 5G-n túli mobil kis cellákhoz: A Survey. *IEEE Access* 7, 59200-59236. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914359>.
- Dixon, P.B., Rimmer, M.T., Validating 2010. a Detailed, Dynamic CGE Model of the USA*. *Economic Record* 86, 22-34. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4932.2010.00656.x>
- Dogra, A., Jha, R.K., Jain, S., A 2020. Survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Építészeti és új technológiák. *IEEE Access* 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234>
- Duggan, J., 2008. A rendszerdinamika és a többcélú optimalizálás használata a komplex rendszerek politikai elemzésének támogatására, in: Qudrat-Ullah, H., Spector, J.M., Davidsen, P.I. (szerk.), *Komplex döntéshozatal: Theory and Practice, Understanding Complex Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 59-81. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73665-3_4.
- Elijah, O., Leow, C.Y., Rahman, T.A., Nunoo, S., Iliya, S.Z., 2016. A Massive MIMO-5G rendszerben a kísérleti szennyeződés átfogó áttekintése. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18, 905-923. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2504379>. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2504379>
- Fang, X., Feng, W., Wei, T., Chen, Y., Ge, N., Wang, C.-X., 5G 2021. Embraces Satellites for 6G Ubiquitous IoT: Alapmodellek az integrált műholdas földfelszíni hálózatokhoz. *IEEE Internet Things J.* 1-1. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3068596>.
- Frank, R.H., A 2011. gazdasági természettudós: Miért magyaráz meg a közgazdaságtan szinte mindent. Random House.
- Gangopadhyay, B., Pedro, J., Spaelter, S., 2019. 5G-kész, több meghibásodással szemben ellenálló és költséghatékony közlekedési hálózatok. *J. Lightwave Technol., JLT* 37,

4062-4072.

Garcia, M.H.C., Molina-Galan, A., Boban, M., Gozavez, J., Coll-Perales, B., Şahin, T., Kousaridas, A., A 2021.Tutorial on 5G NR V2X Communications. IEEE

CommunicationsSurveysTutorials1-1.

<https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3057017>.

- Ge, X., Tu, S., Mao, G., Lau, V.K.N., Pan, L., 2019. Az 5G vezeték nélküli backhaul hálózatok költséghatékonysági optimalizálása. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 18, 2796-2810. <https://doi.org/10.1109/TMC.2018.2886897>.
- Gedel, I., Nwulu, N., 2021. Infrastruktúra megosztása az 5G kiépítéséhez: A Techno-gazdasági elemzés. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijIM)* 15, 137. <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i02.16749>.
- Gedel, I.A., Nwulu, N.I., 2021. Alacsony késleltetésű 5G elosztott vezeték nélküli hálózati architektúra: A Techno-Economic Comparison. *Inventions* 6, 11. <https://doi.org/10.3390/inventions6010011>
- Ghoreishi, S.E., Karamshuk, D., Friderikos, V., Sastry, N., Dohler, M., Aghvami, A.H., 2020. A Caching-as-a-Service költség alapú megközelítése a felhő alapú 5G mobilhálózatokban. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 997-100919,. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2904061>. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2904061>.
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., Zorzi, M., Toward 2020. 6G Networks: Felhasználási esetek és technológiák. *IEEE Communications Magazine* 55-6158,. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- Giordani, M., Zorzi, M., 2021. Nem földi hálózatok a 6G korszakban: Kihívások és lehetőségek. *IEEE Network* 244-251. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000493>
- GSMA, GSMA 2020. | The Mobile Economy North America | 2020 The Mobile Economy. GSM Association, London.
- Gures, E., Shayea, I., Alhamadi, A., Ergen, M., Mohamad, H., 2020. Átfogó áttekintés a mobilitáskezelésről az 5G heterogén hálózatokban: Architektúrák, kihívások és megoldások. *IEEE Access* 195883-1959138,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030762>.
- Haddaji, N., Bayati, A., Nguyen, K., Cheriet, M., 2018. BackHauling-as-a-Service (BHaaS) az 5G optikai szeletelt hálózatokhoz: Egy optimalizált TCO-megközelítés. *Journal of Lightwave Technology* 36, 4006-4017. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2855148>. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2855148>
- Haile, B.B., Mutafungwa, E., Hämäläinen, J., A 2020. Data-Driven Multiobjective Optimization Framework for Hyperdense 5G Network Planning. *IEEE Access* 169423-1694438,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3023452>.
- Han, B., Tayade, S., Schotten, H.D., A szeletelt 5G hálózatok nyereségének modellezése 2017. a fejlett hálózati erőforrás-kezelés és a szelet megvalósítása érdekében, in: 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Presented at the 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 576-581. <https://doi.org/10.1109/ISCC.2017.8024590>.
- Hidayati, A., Reza, M., Adriansyah, N.M., Nashiruddin, M.I., Techno-Economic 2019. Analysis of Narrowband IoT (NB-IoT) Deployment for Smart Metering, in: 2019 Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering (APCoRISE). Bemutatták a 2019 Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering (APCoRISE) című konferencián, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/APCoRISE46197.2019.9318920>
- Hoeschele, T., Dietzel, C., Kopp, D., Fitzek, F.H.P., Reisslein, M., Az Internet Exchange Point (IXP) infrastruktúra jelentősége 2021. az 5G számára: az 5G felhasználási esetek hatásának becslése. *Távközlési politika* 45, 102091. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102091>

- Hossain, M.I., Markendahl, J.I., 2021. Az LPWAN technológiák összehasonlítása: Költségszerkezet és skálázhatóság. *Wireless Pers Commun.* <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08664-0>.
- Hui, H., Ding, Y., Shi, Q., Li, F., Song, Y., Yan, J., 5G 2020.hálózat alapú Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential. *Applied Energy* 113972257, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113972>.

- Ilderem, V., Az 5G alapjául szolgáló 2020.technológia. Nat Electron 5-63., <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0363-6>.
- Nemzetközi Távközlési Unió, IMT2015. Vision - Az IMT jövőbeli fejlődésének kerete és általános célkitűzései 2020-ig és azon túl. Nemzetközi Távközlési Unió, Genf, Svájc.
- Jha, A., Saha, D., 2018. Az 5G kiépítési forgatókönyvek techno-gazdasági elemzése, beleértve a Massive MIMO HetNets over mmWave: A Case Study on the US State of Texas, in: Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences.
- Jiang, T., Zhang, J., Tang, P., Tian, L., Zheng, Y., Dou, J., Asplund, H., Raschkowski, L., D'Errico, R., Jämsä, T., 3GPP2021. Standardized 5G Channel Model for IIoT Scenarios: A Survey. IEEE Internet of Things Journal 8799-88158., <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048992>.
- Jiang, X., Sheng, M., Zhao, N., Xing, C., Lu, W., Wang, X., Green 2021.UAV communications for 6G: A survey. Chinese Journal of Aeronautics. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.04.025>.
- Kar, U.N., Sanyal, D.K., 2019. A 3GPP szabványosításának kritikai áttekintése a készülék-eszköz kommunikációról a cellás hálózatokban. SN COMPUT. SCI,37.. <https://doi.org/10.1007/s42979-019-0045-5>.
- Khan, L.U., Yaqoob, I., Imran, M., Han, Z., Hong, C.S., 6G2020. Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. IEEE Access 147029-1470448., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015289>.
- Kobos, P.H., Drennen, T.E.-X., Outkin, A.V., Webb, E.K., Paap, S.M., Wiryadinata, S., Techno-gazdasági2020. elemzés: Best Practices and Assessment Tools. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (Egyesült Államok); Sandia
- Kusuma, A.A., Suryanegara, M., A mobilhálózat 5G-re történő korszerűsítése2019.: Indonézia főbb városainak műszaki-gazdasági elemzése, in: 2019 16th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering. Elhangzott a 16th2019 International Conference on Quality in Research (QIR) konferencián: International Symposium on Electrical and Computer Engineering, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/QIR.2019.8898260>. <https://doi.org/10.1109/QIR.2019.8898260>.
- Lagunas, E., Tsinos, C.G., Sharma, S.K., Chatzinotas, S., 5G 2020.Cellular and Fixed Satellite Service Spectrum Coexistence in C-Band. IEEE hozzáférés 72078-720948., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985012>.
- Le, T.-K., Salim, U., Kaltenberger, F., An2021. Overview of Physical Layer Design for Ultra- Reliable Low-Latency Communications in 3GPP Releases and 15,16,IEEE17. Access 433-4449., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046773>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046773>.
- Lehr, W., Queder, F., Haucap, J., 2021. 5G: új jövő a mobilhálózat-üzemeltetők számára, vagy mégsem?Távközlési politika45, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102086>
- Lema, M.A., Laya, A., Mahmoodi, T., Cuevas, M., Sachs, J., Markendahl, J., Dohler, M., Business 2017.Case and Technology Analysis for 5G Low Latency Applications. IEEE Access 5, 5917-5935. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685687>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685687>
- Lemstra, W., 2018. Vezető szerep az 5G-vel Európában: Két ellentétes kép a jövőről, szakpolitikai és szabályozási következményekkel. Távközlési politika, Az 5G hálózatok következményei: A mobilinnováció útjának egyengetése? 42, 587–611. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.02.003>
- Leyva-Mayorga, I., Soret, B., Röper, M., Wübben, D., Matthiesen, B., Dekorsy, A., Popovski, P., LEO2020. Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications. IEEE Access 8, 184955-184964. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029620>.

- Liu, C., Feng, W., Chen, Y., Wang, C.-X., Ge, N., 2021. Cellafüggetlen műholdas-UAV hálózatok a 6G széleskörű tárgyak internetéhez. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 39, 1116-1131. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3018837>. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3018837>
- Liu, D., Wang, L., Chen, Y., Zhang, T., Chai, Michael, Chai, Maged, Elkashlan, 2015. Distributed Energy Efficient Fair User Association in Massive MIMO Enabled HetNets. *accepted by IEEE Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2454504>
- Luong, N.C., Wang, P., Niyato, D., Liang, Y., Han, Z., Hou, F., 2018. Gazdasági és árképzési modellek alkalmazása az 5G vezeték nélküli hálózatok erőforrás-kezeléséhez: A Survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 1-1. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2870996>.
- Magne, F., Ramirez, A., Paoloni, C., 2018. Milliméterhullámú pont-multipont a sűrű cellás hálózatok megfizethető, nagy kapacitású backhauljához, in: 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Bemutatták a 2018. évi IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) konferencián, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2018.8377446>.
- Marotta, A., Kondepu, K., Cassioli, D., Antonelli, C., Correia, L.M., Valcarengi, L., 2018. Szoftveresen definiált 5G konvergált hozzáférés mint életképes műszaki-gazdasági megoldás, in: Optical Fiber Communication Conference (2018), Paper Th1B.2. Prezentálva az Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, p. Th1B.2. <https://doi.org/10.1364/OFC.2018.Th1B.2>.
- Martín, J.R., Pérez-Leal, R., Navío-Marco, J., 2019. Az 5G felé: A megfelelő felhasználási esetek műszaki-gazdasági elemzése. *Netnomics*. <https://doi.org/10.1007/s11066-019-09134-3>
- Massaro, M., Beltrán, F., 2020. Az 5G több spektrummegosztáshoz fog vezetni? Az LSA és a CBRS spektrummegosztási keretrendszerek legújabb fejleményeinek megvitatása. *Távközlési politika* 44, 101973. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101973>
- Matinmikko, M., Latva-aho, M., Ahokangas, P., Seppänen, V., 2018. Az 5G szabályozásáról: mikroengedélyezés a helyben üzemeltetett hálózatok számára. *Távközlési politika, Az 5G hálózatok következményei: A mobil innováció útjának egyengetése?* 42, 622-635. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.004>.
- McNutt, M., *Reprodukálhatóság* 2014.. *Science* 229-229343., <https://doi.org/10.1126/science.1250475>
- Mezzavilla, M., Zhang, M., Polese, M., Ford, R., Dutta, S., Rangan, S., Zorzi, M., 2018. Az 5G mmWave hálózatok végponttól végpontig tartó szimulációja. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20, 2237-2263. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2828880>. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2828880>
- Monserat, J.F., Bouchmal, F., Martin-Sacristan, D., Carrasco, O., 2020. Multi-Radio Dual Connectivity for 5G Small Cells Interworking. *IEEE Communications Standards Magazine* 4, 30-36. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800030>. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800030>.
- Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., Alouini, M.-S., 2018. Az 5G teljes dimenziójú tömeges MIMO rendszerek tervezése. *IEEE Transactions on Communications* 726-66,740. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2762685>.
- Narayanan, A., Sena, A.S.D., Gutierrez-Rojas, D., Melgarejo, D.C., Hussain, H.M., Ullah, M., Bayhan, S., Nardelli, P.H.J., 2020. A Pervasive Edge Computing kulcsfontosságú előrelépései a dolgok ipari internetéhez az 5G-ben és azon túl. *IEEE Access* 8, 206734-206754. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037717>
- Navarro-Ortiz, J., Sendra, S., Ameigeiras, P., Lopez-Soler, J.M., LoRaWAN és 4G/5G integrációja 2018. a dolgok ipari internetéhez. *IEEE Communications Magazine* 56,

60-67.

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700625>.

<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700625>

Neokosmidis, I., Rokkas, T., Paglierani, P., Meani, C., Nasr, K.M., Moessner, K., Khodashenas, P.S., Assessment2019. of CAPEX and OPEX for Media Services in

- Felhőalapú 5G hálózatok, in: CTTE-FITCE: Intelligens városok információs és kommunikációs technológiája (CTTE-FITCE). Előadás a 2019 CTTE-FITCE: Smart Cities Information and Communication Technology (CTTE-FITCE) című konferencián, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/CTTE-FITCE.2019.8894826>.
- Nikolikj, V., Janevski, T., 2015. A "TERA-korszakban" kiépítendő fejlett vezeték nélküli heterogén hálózatok korszerű üzleti teljesítményének értékelése. *Wireless Pers Commun* 84, 2241-2270. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2491-2>.
- Oladejo, S.O., Falowo, O.E., Latency-Aware2020. Dynamic Resource Allocation Scheme for Multi-Tier 5G Network: A Network Slicing-Multitenancy Scenario. *IEEE Access* 8, 74834-74852. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988710>.
- Ouamri, M.A., Oteşteanu, M.-E., Isar, A., Azni, M., 2020. Lefedettség, Handoff és költségoptimalizálás az 5G heterogén hálózathoz. *Physical Communication* 39, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101037>.
- Oughton, E.J., Comini, N., Foster, V., Hall, J.W., Policy2021. Choices Can Help Keep 4G and 5G Universal Broadband Affordable. Világbank, Policy Research Working Paper 1. Oughton, E.J., Frias, Z., The2018. cost, coverage and rollout implications of 5G infrastructure in Britain. *Telecommunications Policy*, Az 5G hálózatok következményei: Az útépités a mobil innováció útját? 42, 636-652. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.07.009>
- Oughton, E.J., Frias, Z., Exploring2016. the cost, coverage and rollout implications of 5G in Britain: Jelentés a brit Nemzeti Infrastruktúra Bizottság számára. Centre for Risk Tanulmányok, Cambridge Judge Business School, Cambridge.
- Oughton, E.J., Frias, Z., Russell, T., Sicker, D., Cleevely, D.D., 2018. Az 5G felé: A mobil távközlési infrastruktúra jövőbeli kínálatának és keresletének forgatókönyv-alapú értékelése. *Technológiai előrejelzés és társadalmi változások* 141-155133. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.03.016>
- Oughton, E.J., Frias, Z., van der Gaast, S., van der Berg, R., 2019a. Az 5G infrastrukturális stratégiák kapacitásának, lefedettségének és költségeinek értékelése: Hollandia elemzése. *Telematics and Informatics* 37, 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.01.003>.
- Oughton, E.J., Jha, A., Supportive2021. 5G Infrastructure Policies are Essential for Universal 6G: Assessment using an Open-source Techno-economic Simulation Model utilizing Remote Sensing. *IEEE Access* 1-1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097627>.
- Oughton, E.J., Katsaros, K., Entezami, F., Kaleshi, D., Crowcroft, J., 2019b. Egy nyílt forráskódú techno-gazdasági értékelési keretrendszer az 5G kiépítéséhez. *IEEE Access* 155930-1559407. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949460>.
- Oughton, E.J., Russell, T., 2020a. A térbeli-időbeli infrastruktúra-értékelés fontossága: Bizonyítékok az 5G-re vonatkozóan az Oxford-Cambridge ívből. Számítógépek, környezet és városi rendszerek 83,101515. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101515>
- Oughton, E.J., Russell, T., 2020b. cdcam: Cambridge Digital Communications Assessment Model. *Journal of Open Source Software* <https://doi.org/10.21105/joss.01911> 5, Pagani1911., M., Fine, C.H., Value 2008.network dynamics in 3G-4G wireless communications: A stratégiai értébecslés rendszerszemléletű megközelítése. *Journal of Business Research* 61, 1102-1112.
- Paglierani, P., Neokosmidis, I., Rokkas, T., Meani, C., Nasr, K.M., Moessner, K., Khodashenas, P.S., 2019. Az 5G immersív médiaszolgáltatások műszaki-gazdasági elemzése felhőalapú kis cellás hálózatokban: A semleges fogadó üzleti modell. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. <https://doi.org/10.1002/ett.3746>.

Pavon-Marino, P., Moreno-Muro, F.-J., Garrich, M., Quagliotti, M., Riccardi, E., Rafel, A., Lord, A., Techno-Economic2020. Impact of Filterless Data Plane and Agile Control
(A szűrő nélküli adatsík és az agilis vezérlés techno-gazdasági hatása)

26. oldal 31

- Sík az 5G optikai metróban. *Journal of Lightwave Technology* 38, 3801-3814. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2982131>. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2982131>
- Pham, Q.-V., Fang, F., Ha, V.N., Piran, Md.J., Le, M., Le, L.B., Hwang, W.-J., Ding, Z., 2020. Az 5G-ben és azon túl a többszörös hozzáférést peremszámítástechnika áttekintése: Alapok, technológiai integráció és a technika jelenlegi állása. *IEEE Access* 116974-1170178,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001277>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001277>
- Pokhrel, S.R., Kumar, N., Walid, A., 2021. Towards Ultra Reliable Low Latency Multipath TCP For Connected Autonomous Vehicles (Ultra megbízható, alacsony késleltetésű, többutas TCP a csatlakoztatott autonóm járművek számára). *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 1-1. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3093632>.
- Popovski, P., Nielsen, J.J., Stefanovic, C., Carvalho, E. de, Strom, E., Trillingsgaard, K.F., Bana, A.-S., Kim, D.M., Kotaba, R., Park, J., Sorensen, R.B., 2018. Vezeték nélküli hozzáférés az ultra-megbízható, alacsony késleltetésű kommunikációhoz: Principles and Building Blocks. *IEEE Network* 32, 16-23. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700258>. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700258>
- Porter, M.E., Versenyképes 1980. stratégia: Porter: Technika az iparágak és a versenytársak elemzéséhez. Prasad, K.N.R.S.V., Hossain, E., Bhargava, V.K., Energy 2017. Efficiency in Massive MIMO- Based 5G Networks: Lehetőségek és kihívások. *IEEE Wireless Communications* 24, 86–94. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500374WC>
- Raza, M.R., Fiorani, M., Skubic, B., Mårtensson, J., Wosinska, L., Monti, P., Power2015. and cost modeling for 5G transport networks, in: 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bemutatták a 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) konferencián, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2015.7193533>.
- Rendon Schneir, J., Ajibulu, A., Konstantinou, K., Bradford, J., Zimmermann, G., Droste, H., Canto, R., 2019. Az 5G mobil szélessávú szélessávú szolgáltatás üzleti esete egy sűrű városi területen. *Távközlési politika* 43, 101813. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.03.002>
- Rendón Schneir, J., Whalley, J., Amaral, T.P., Pogorel, G., 2018. Az 5G hálózatok következményei: A mobil innováció útjának előkészítése? *Távközlési politika*, Az 5G hálózatok következményei: Paving the way for mobile innovation? 42, 583-586. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2018.06.001>.
- Rianti, D., Hikmaturokhan, A., Rachmawaty, D., 2020. Techno-gazdasági 5G új rádiótervezés GHz-es 26 frekvenciát használva a Pulogadung ipari területen, in: 2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI). Presented at the 2020 3rd International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), pp. 272-277. <https://doi.org/10.1109/ISRITI51436.2020.9315455>. <https://doi.org/10.1109/ISRITI51436.2020.9315455>.
- Sachs, J., Andersson, L.A.A., Araújo, J., Curescu, C., Lundsjö, J., Rune, G., Steinbach, E., Wikström, G., 2019. Adaptív 5G alacsony késleltetésű kommunikáció a taktikus internéti szolgáltatásokhoz. *Proceedings of the IEEE* 325–349. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2864587>
- Sachs, J., Wikstrom, G., Dudda, T., Baldemair, R., Kittichokechai, K., 2018. 5G rádiós hálózat tervezés az ultra-megbízható, alacsony késleltetésű kommunikációhoz. *IEEE Network* 32, 24-31. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700232>. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700232>
- Saha, R.K., 2020. A beltéri kis cellák építészeti kihasználásának taktikája az 5G dinamikus spektrummegosztásához. *IEEE Access* 15056-150718,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966230>.

Santoyo-González, A., Cervelló-Pastor, C., 2018. A szolgáltatási infrastruktúra elhelyezésének késleltetés-tudatos költségoptimalizálása 5G hálózatokban. *Journal of Network and Computer Applications* 114, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.04.007>. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2018.04.007>.

- Sathya, V., Kala, S.M., Rochman, M.I., Ghosh, M., Roy, S., 2020. A mobil és Wi-Fi együttélésének szabványosítási előrelépései az engedély nélküli 5 és 6 GHz-es sávokban. *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.* 24, 5-15. <https://doi.org/10.1145/3417084.3417086>. <https://doi.org/10.1145/3417084.3417086>.
- Sevastianov, L.A., Vasilyev, S.A., Telecommunication2018. market model and optimal pricing scheme of 5G services, in: *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2018: 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Előadva a 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp.1–6. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2018.8631269>
- Shah, S.W.H., Mian, A.N., Mumtaz, S., Crowcroft, J., 2019. Rendszerkapacitás-elemzés ultrasűrű, többszintű jövőbeli cellás hálózatokhoz. *IEEE Access* 50503-505127,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911409>.
- Shu, Z., Taleb, T., 2020. Újszerű QoS keretrendszer a hálózati szeleteléshez az 5G és azon túli hálózatokban az SDN és az NFV alapján. *IEEE Network* 256-26334,. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900423>.
- Siriwardhana, Y., Poramage, P., Liyanage, M., Ylianttila, M., 2021. A Survey on Mobile Augmented Reality With 5G Mobile Edge Computing: Architectures, Applications, and Technical Aspects. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 23, 1160-1192. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3061981>. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3061981>.
- Smail, G., Weijia, J., 2017. Technikai-gazdasági elemzés és előrejelzés az 5G mobilhálózat kiépítésére, in: *2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*. Előadás a 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN) című konferencián (2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)), pp. 9-16. <https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899243>.
- Suryanegara, M., 2018. Az 5G gazdaságtana: az egy felhasználóra jutó bevételről a gépenkénti bevételre való áttérés, in: *2018 International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*. Elhangzott a 182018. Nemzetközi Hírközlési és Információs Technológiai Szimpóziumon (ISCIT), pp. 191-194. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2018.8588006>.
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., Sabella, D., 2017. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 1657-168119,. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2705720>. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2705720-1681>. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2705720>
- Torre, R., Leyva-Mayorga, I., Pandi, S., Salah, H., Nguyen, G.T., Fitzek, F.H.P., 2020. Hálózati kódolt együttműködés megvalósítása energiahatékony tartalomelosztáshoz 5G mobil kis cellákban. *IEEE Access* 185964-1859808,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029601>.
- Udalcovs, A., Levantesi, M., Gaudino, R., Urban, P., Mello, D.A.A., Ozolins, O., Monti, P., 2018. Betekintés az 5G Fronthauling teljes tulajdonlási költségébe, in: *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. Előadva a 202018. nemzetközi konferencián az átlátszó optikai hálózatokról (ICTON), pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8474008>.
- Udalcovs, A., Levantesi, M., Urban, P., Mello, D.A.A., Gaudino, R., Ozolins, O., Monti, P., 2020. A digitális vs. analóg Radio-Over-Fiber architektúrák teljes üzemeltetési költsége az 5G Fronthauling számára. *IEEE Access* 223562-2235738,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044396>. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044396>.

Vannieuwenborg, F., Verbrugge, S., Colle, D., 2017. Egy intelligens tehenmonitorozó rendszer tervezése és értékelése műszaki-gazdasági szempontból, in: 2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks. Prezentálva a 2017 Internet of Things

BusinessModels,Users,andNetworkskonferencián

,pp.1–

8.<https://doi.org/10.1109/CTTE.2017.8260982>

- Varian, H.R., 2014. Nagy adatok: Új trükkök az ökonometria számára. *Journal of Economic Perspectives* 28, 3-28.
- Vuojala, H., Mustonen, M., Chen, X., Kujanpää, K., Ruuska, P., Höyhty, M., Matinmikko-Blue, M., Kalliovaara, J., Talmola, P., Nyström, A.-G., 2019. A vertikális hálózati szolgáltatók spektrumhozzáférési lehetőségei az 5G-ben. *Telecommunications Policy* 101903. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.101903>.
- Wan, L., Guo, Z., Wu, Y., Bi, W., Yuan, J., Elkashlan, M., Hanzo, L., 4G/5G2018. Spectrum Sharing: Hatékony 5G telepítés a továbbfejlesztett mobil szélessávú és a tárgyak internetének alkalmazásaihoz. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 28-3913., <https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2865830>.
- Webb, W., 2016. Az 5G mítosz: És hogy miért jobb jövő a következetes összeköttetés. *Webb Search Limited, Cambridge*.
- Wijethilaka, S., Liyanage, M., Survey2021. on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 23, 957-994. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3067807>.
- Wilson, G., Aruliah, D.A., Brown, C.T., Hong, N.P.C., Davis, M., Guy, R.T., Haddock, S.H.D., Huff, K.D., Mitchell, I.M., Plumbley, M.D., Waugh, B., White, E.P., Wilson, P., Best2014. Practices for Scientific Computing. *PLOS Biology* e100174512., <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001745>.
- Wilson, G., Bryan, J., Cranston, K., Kitzes, J., Nederbragt, L., Teal, T.K., 2017. Elég jó gyakorlatok a tudományos számítástechnikában. *PLOS Computational Biology* e100551013., <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005510>.
- Wisely, D., Wang, N., Tafazolli, R., 2018. Az 5G hálózatok kapacitása és költségei sűrű városi területeken. *IET Communications* 2502-251012., <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.5505>.
- Xu, Y., Gui, G., Gacanin, H., Adachi, F., 2021. Az 5G heterogén hálózatok erőforrás-elosztásának áttekintése: Current Research, Future Trends, and Challenges (Jelenlegi kutatások, jövőbeli trendek és kihívások). *IEEE Communications Surveys Tutorials* 668-69523, <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3059896>.
- Yaghoubi, F., Mahloo, M., Wosinska, L., Monti, P., Farias, F. d S., Costa, J.C.W.A., Chen, J., 2018. Techno-gazdasági keretrendszer az 5G közlekedési hálózatokhoz. *IEEE Wireless Communications* 25, 56-63. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700233>.
- Yaghoubi, F., Mahloo, M., Wosinska, L., Monti, P., Farias, F.S., Costa, J.C., Chen, J., 2019. Az 5G közlekedési hálózatok műszaki-gazdasági és üzleti megvalósíthatósági elemzése. *Optikai és vezeték nélküli konvergencia az 5G hálózatokhoz* 273-295.
- You, X., Wang, C.-X., Huang, J., Gao, X., Zhang, Z., Wang, M., Huang, Y., Zhang, C., Jiang, Y., Wang, Jiaheng, Zhu, M., Sheng, B., Wang, D., Pan, Z., Zhu, Pengcheng, Yang, Y., Liu, Z., Zhang, P., Tao, X., Li, S., Chen, Zhi, Ma, X., I, C.-L., Han, S., Li, K., Pan, C., Zheng, Z., Hanzo, L., Shen, X. (Sherman), Guo, Y.J., Ding, Z., Haas, H., Tong, W., Zhu, Peiying, Yang, G., Wang, Jun, Larsson, E.G., Ngo, H.Q., Hong, W., Wang, H., Hou, D., Chen, J., Chen, Zhe, Hao, Z., Li, G.Y., Tafazolli, R., Gao, Y., Poor, H.V., Fettweis, G.P., Liang, Y.-C., 2020. A 6G vezeték nélküli kommunikációs hálózatok felé: jövőkép, alaptermotechnológiák és új paradigmaváltások. *Sci. China Inf. Sci* 64,110301.. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-2955-6>
- Yue, X., Pye, S., DeCarolis, J., Li, F.G., Rogan, F., Gallachóir, B.Ó., 2018. Az energiarendszer-optimalizálási modellek bizonytalansági értékelésének megközelítései áttekintése. *Energy strategy reviews* 21, 204-217.

Yunas, S.F., Niemelä, J., Valkama, M., Isotalo, T., 2014. A hagyományos és az ultrasűrű kiscella-hálózatok műszaki-gazdasági elemzése és összehasonlítása, in: 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops. IEEE, pp. 768-776.

- Yunas, S.F., Valkama, M., Niemelä, J., 2015. A dinamikus DAS és az örökölt makrocellás sűrítés műszaki-gazdasági összehasonlítása. *Int J Wireless Inf Networks* 22, 312-326. <https://doi.org/10.1007/s10776-015-0286-8>.
- Zhang, K., Zhu, Y., Maharjan, S., Zhang, Y., Edge 2019. Intelligence and Blockchain Empowered 5G Beyond for the Industrial Internet of Things. *IEEE Network* 12-1933,. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1800526>.
- Zhang, P., Lu, J., Wang, Y., Wang, Q., 2017. Kooperatív lokalizáció 5G hálózatokban: A survey. *ICT Express* 3, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.005>.
- Zhou, Z., Chen, X., Zhang, Y., Mumtaz, S., 2020. Blockchain-alapú biztonságos spektrummegosztás az 5G heterogén hálózatokhoz. *IEEE Network* 24-3134,. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900188>.
- Zugno, T., Drago, M., Giordani, M., Polese, M., Zorzi, M., 2020. A milliméterhullámú jármű-jármű hálózatok szabványosítása felé: Nyitott kihívások és teljesítményértékelés. *IEEE Communications Magazine* 79-8558,. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000041>.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000041>

Függelék

Betűszó	Teljes időtartam
3GPP	3. generációs partnerségi projekt
5G	Ötödik generáció
5G NR	Ötödik generációs új rádió
6G	Hatodik generáció
ARPU	Átlagos bevétel egy felhasználóra vetítve
Capex	Tőkeköltségek
COTS	Kereskedelmi Off The Shelf
C-RAN	Felhőalapú rádiós hozzáférési hálózat
DCA	Diszkontált készpénzelemzés
eMBB	Továbbfejlesztett mobil szélessávú internet
FTTP	Fiber To The Premises
GUI	Grafikus felhasználói felület
HetNet	Heterogén hálózat
IEEE	Elektromérnökök és Elektronikai Mérnökök Intézete
IIoT	Ipari internet vagy dolgok
IoT	A dolgok internete
IRR	Belső megtérülési ráta
LMIC	Alacsony és közepes jövedelmű ország
LTE	Hosszú távú fejlődés
LTE-A	Hosszú távú fejlődés Advanced
Massive-MIMO	Massive Multiple In Multiple Out
MIMO	Többszörös be többszörös ki
MIoT	A dolgok tömeges internete
mMTC	Tömeges géptípusú kommunikáció
mmW	Milliméteres hullám
MNO	Mobilhálózat-üzemeltetők
NB-IoT	A dolgok szűk sávú internete
Next-G	Következő generáció
NFV	Hálózati funkciók virtualizálása
NPV	Nettó jelenérték
Opex	Működési kiadások
PoP	Jelenléti pont
RAN	Rádió-hozzáférési hálózat
ROI	A befektetés megtérülése
SDN	Szoftver által meghatározott hálózat
TCO	Teljes tulajdonlási költség
TEA	Techno-gazdasági elemzés
TWDM-PON-ok	Idő- és hullámhossz-multiplexelt passzív optikai hálózatok
UAV	Pilóta nélküli légi jármű
uRLLC	Rendkívül megbízható, alacsony késleltetésű kommunikáció