



TEMESVÁRI ZSOLT MARCELL

Ad-hoc strukturált
mobil bázisállomások
vészhelyzeti alkalmazásai,
valamint a
mobil technológiák
konvergenciájának kérdései

Témavezető: Dr. Maros Dóra

Szigorlati/komplex vizsga bizottság:

Elnök:

Prof. Dr. Berek Lajos

Tagok:

Dr. habil. Kádár Péter

Dr. Berek Tamás

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Rajnai Zoltán

Titkár:

Dr. Pálfi Judith

Tagok:

Dr. habil. Kádár Péter

Dr. Schuster György

Dr. Berek Tamás

Bírálok:

Dr. Fekete Károly

Dr. Varga Péter János

Nyilvános védés időpontja:

2022

NYILATKOZAT

A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK

MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott Temesvári Zsolt Marcell kijelentem, hogy a „Ad-hoc strukturált mobil bázisállomások vészhelyzeti alkalmazásai, valamint a mobil technológiák konvergenciájának kérdései” című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2022. 06. 27.

Temesvári Zsolt Marcell

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
A tudományos probléma megfogalmazása	1
Célkitűzések	2
A téma kutatásának hipotézisei	2
Kutatási módszerek	3
1 VÉSZHELYZETI MOBIL KOMMUNIKÁCIÓ TERÜLETEINEK ÁTTEKINTÉSE	3
1.1 Hálózati sérülékenységek krízishelyzet esetén	4
1.1.1 Katasztrófák, terrorizmus és háborúk	4
1.1.2 Esettanulmányok	8
1.2 Nemzetközi szabályozások és projektek	10
1.2.1 ITU vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos törekvései	10
1.2.2 ETSI – EMTEL vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos törekvései	12
1.3 Európai Unió szabályozási környezet a kritikus infrastruktúrákra vonatkozólag	13
1.4 A kríziskezelés egyes lehetséges hálózati megoldásai	14
1.4.1 Vészhelyzeti kommunikáció biztosítása földi szolgáltatás kiesése esetén	14
1.4.2 Vészhelyzeti kommunikáció ad-hoc telepítésű mobil bázisállomásokkal	15
2 VÉSZHELYZETI BÁZISÁLLOMÁSOK FREKVENCIATERVEZÉSE	16
2.1 A mobil szolgáltatásokhoz szükséges spektrum	16
2.2 A frekvenciatervezés menete, lépései	19
2.2.1 Frekvenciatervezés nagyvárosban	20
2.2.2 Interferencia mátrix számítása	21
2.2.3 Szimulátoros frekvenciatervezés megvalósítása	23
2.2.4 A BCCH réteg vészhelyzeti frekvenciatervezése	25
2.2.5 A TCH réteg vészhelyzeti frekvenciatervezése	29
2.2.6 1/1 módszer vészhelyzeti alkalmazása	33
2.3 Következtetések	37

3	KAPACITÁS PROBLÉMÁK VÉSZHELYZETBEN.....	37
3.1	Vészhelyzeti felhasználók kiértékelésének megoldásai.....	40
3.2	Mobil hálózatok forgalmának prognosztizációja.....	41
3.2.1	Adatforgalmi trendek tömegrendezvényeken.....	43
3.2.2	Nagyvárosok adatforgalma.....	46
3.2.3	2G és 4G hálózati (hang és adat) forgalom	48
3.3	Kritikus kapacitásproblémák élőhálózati analízise	51
3.3.1	Kapacitástervezési szempontok 2G hálózat esetén	52
3.3.2	Kapacitástervezési szempontok 4G hálózat esetén	55
3.3.3	Vészhelyzeti kapacitásproblémák 2G hálózaton	59
3.3.4	Kapacitásszámítás network sharing esetén 2G hálózaton	65
3.3.5	Vészhelyzeti kapacitásproblémák 4G hálózaton	66
3.3.6	Kapacitás számítás network sharing esetén 4G hálózatokon	75
3.4	Következtetések	77
4	LEFEDETTSÉGI PROBLÉMÁK VÉSZHELYZETBEN	78
4.1	Vészhelyzeti kommunikáció analízise kieső bázisállomások esetén	78
4.1.1	4G bázisállomás kiesése nagyvárosi környezetben.....	80
4.1.2	2G bázisállomás kiesése nagyvárosi környezetben.....	87
4.1.3	4G bázisállomás kiesése vidéki/kisvárosi környezetben.....	90
4.1.4	2G bázisállomás kiesése vidéki/kisvárosi környezetben.....	96
4.2	Network sharing vészhelyzeti megfontolásai	97
4.2.1	Network sharing megfontolásai városi környezetben 2G/4G	99
4.2.2	Network sharing megfontolásai vidéki környezetben 2G/4G	107
4.3	Következtetések	111
5	VÉSZHELYZETI BÁZISÁLLOMÁSOKRA VONATKOZÓ SZABÁLYOZÁSI KÉRDÉSEK	113
5.1	Problémafelvetés.....	113
5.2	Magyar jogszabályi környezet a mobil hálózatokra vonatkozólag	115
5.3	Megállapítások.....	116
5.4	Mobil szolgáltatókra vonatkozó vészhelyzeti szempontrendszer megalkotása	119

5.5	Következtetések	125
6	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	126
6.1	Új tudományos eredmények.....	126
6.2	Ajánlások	127
	IRODALOMJEGYZÉK.....	128
	ÉRTEKEZÉSEL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓIM.....	138
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	139
	TÁBLÁZATJEGYZÉK	143
	ÁBRAJEGYZÉK	145
	FÜGGELÉK.....	153
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	183

BEVEZETÉS

A mobil hálózatok használata napjainkra életünk alaprészévé váltak, az egyre növekvő felhasználói igényeknek köszönhetően a mobil hálózatok terheltsége permanensen növekszik [1]. A piaci elvárások kielégítésére a szolgáltatók folyamatos hálózatfejlesztési projekteket és zöldmezős beruházásokat hajtanak végre. A jelenleg is zajló hálózatmodernizáció keretében az 5G technológia implementálásra kerül, melynek köszönhetően a rádiós hálózatok nagyobb kapacitást és magasabb adatátviteli sebességet lesznek képesek biztosítani [2][3].

A kutatási téma időszerűségét a világszerte egyre sűrűbben tapasztalható természeti katasztrófák, terrorcselekmények és háborúk támasztják alá, melyek befolyásolják a mobil bázisállomások üzemfolytonosságát. Az értekezés véglegesítésének idején zajlik az Oroszország és Ukrajna közti háború, ahol a rendelkezésre álló mobil bázisállomások sorra hatástalanításra kerülnek, sérülnek vagy válnak teljesen működésképtelenné a bombázások során. A vészhelyzeti kommunikációra tehát egyre nagyobb hangsúly kerül, a téma kiemelt jelentőségű a vészhelyzeti események elhárítása, valamint a mentési folyamatok vonatkozásában.

A tudományos probléma megfogalmazása

A mobil hálózatok működésfolytonosságának jelentősége egyre nagyobb az elmúlt évtizedek során bekövetkezett súlyos terrortámadások, háborús cselekmények, krízishelyzetek, valamint a globális felmelegedés következtében emelkedő tendenciát mutató természeti katasztrófáknak köszönhetően. A kommunikáció folytonossága elengedhetetlen ilyen helyzetben, a mobil hálózatok segítségével történhet a krízishelyzet megoldására vonatkozó releváns információk begyűjtése, a külvilág vészhelyzeti eseménnyel kapcsolatos tájékoztatása, valamint a segélykérés. Kritikus esetekben a hálózati lefedettséget biztosító bázisállomások kieshetnek a szolgáltatásból akár fizikai rongálódás, akár informatikai támadás miatt, de sok esetben a hirtelen megnövekedett forgalom jelentős torlódásokat okoz, mint ahogy ezt számos megtörtént eset is igazol. A hálózatok méretezése ugyanakkor kategorikusan elmarad a pánikhelyzetben megemelkedett forgalmi terhelésektől, valamint a bázisállomások üzemfolytonossága is sérül bizonyos események során, melyek következtében a hívás és adatforgalmi kapcsolódások sikerességi aránya drasztikusan csökken.

A tudományos kutatásom a mobil bázisállomások vészhelyzetben alkalmazható frekvenciatervezési kérdéseire, a krízishelyzetben tapasztalható kapacitásproblémákra, a bázisállomások kieséséből adódó lefedettségvesztéségi megfontolásokra, az operátorok által alkalmazott eltérő hálózati struktúrából adódó differenciákra, valamint a vészhelyzeti bázisállomás létesítésével kapcsolatos jogszabályi hiányosságokra keres választ.

Célkitűzések

Értekezésemben a mobil hálózatok vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos megfontolásaival és a technológiai konvergenciák kérdéseivel foglalkozom. Kutatásom a publikus mobil hálózatok elemzésére terjed ki, a törekvéseim célját tehát a civilek által igénybe vehető technológiák képezik, a zárt célú hálózatokat (pl. TETRA) nem vizsgálom, hiszen azok kizárólag a rendvédelmi szervek számára nyújtanak kommunikációs lehetőséget.

Értekezésem célja a különböző mobil technológiák által biztosítható hálózati erőforrások és lefedettség átvilágítása cellatervezési, frekvenciatervezési, valamint optimalizálási szempontból, továbbá a hazai szabályozási környezet elemzése a vészhelyzeti kommunikáció vonatkozásában. Olyan tervezői szimulátorok segítségével analizálom a rádiós hálózatokat, melyek a mobil technológiák (2G és 4G) és alkalmazott frekvenciák tükrében valóságúen reprezentálják az élőhálózati attribútumokat. Ennek keretében vizsgálatokat végzek a vészhelyzeti állomások optimális frekvenciatervezési metodológiájának megalkotására, valamint különböző vészhelyzeti események szimulációjával predikciókat teszek a bázisállomások elérhetősége tekintetében. Továbbá élőhálózati analíziseken keresztül feltárom a vészhelyzeti kommunikáció potenciális kapacitás problémáit és következtetek a mobil cellák forgalmi renitenciájának eshetőségeire. A fentiekben felül áttekintem a kritikus infrastruktúrákra, valamint az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti mobil bázisállomásokra vonatkozó jogszabályi környezetet és az akcidentális hipotézisekre megoldást javasolok. A disszertáció megírásának célja, hogy olyan valós aspektusokra hozzak teoretikus megoldást, amely a vészhelyzeti mobil kommunikációt koherens módon segíti.

A téma kutatásának hipotézisei

HIPOTÉZIS I.

Egy ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomás esetében többféle frekvenciatervezési scenárióból kijelölhető egy olyan megoldás, amely a leghatékonyabban és a legrövidebb időn belül biztosítja az adott terület megnövekedett forgalmi igényeinek jó minőségben történő kielégítését.

HIPOTÉZIS II.

Az átlagos konfigurációval implementált állomások vészhelyzeti alkalmazása a felhasználói szokások megváltozása és a forgalom emelkedéséből adódó kapacitáskorlátok miatt nem nyújt megfelelő biztosítékot a folyamatos hang és adatszolgáltatás szempontjából. Meghatározható egy olyan elméleti módszertan, amely minimalizálja a jelentősen megnövekedett forgalom által okozott torlódásokat kritikus helyzetekben és biztosítja a vészhelyzeti kommunikáció folytonosságát.

HIPOTÉZIS III.

Kritikus helyzetekben, így egy-egy szolgáltató által üzemeltett bázisállomások egyedi vagy tömeges kiesése esetén, illetve olyan helyszíneken, ahol az operátorok szolgáltatásai közt számottevő különbségek adódnak tovább biztosítható vagy kiterjeszhető a mobil szolgáltatás abban az esetben, ha a többi mobil operátor által biztosított rádiós csatornák eseti aggregációja elvégezhető.

HIPOTÉZIS IV.

A kritikus helyzetekre vonatkozó állami, hatósági és mobil szolgáltatói feladatok és kötelezettségek tekintetében a jelenlegi magyarországi jogszabályi háttér nem kellően kidolgozott, sem az ad-hoz telepítésű vészhelyzeti bázisállomások telepítésének, sem pedig ezek lehetséges együttműködésének tekintetében. Kidolgozható egy olyan szempont és eljárásrendszer, amely támogatja a gyors és hatékony intézkedéseket.

Kutatási módszerek

Kutatómunkám során feltérképeztem azokat a lefedettségproblémás helyzeteket, melyek megkövetelik az operátorok technológiáinak konvergenciáját vészhelyzet esetén. Ehhez, valamint a vészhelyzeti frekvenciatervezés biztonságtechnikai kérdéseinek vizsgálatához szükség volt a szolgáltatók által megválasztott hálózattervezői stratégiák felkutatása és megértése, valamint ezek tervező szoftverrel való lemodellezése valós fizikai szimulációs környezetben. Kutatásom elvégzéséhez élőhálózati vizsgálatokat is végeztem, mely során különböző hálózati paraméterek analízisével és hálózati statisztikák elemzésével jutottam következtetéseimre. A mobil kommunikáció vészhelyzeti szabályrendszerének kidolgozásához a vonatkozó jogszabályok áttekintésére, valamint tapasztalati aspektusokra volt szükség.

A választott témakörök széles kompetenciaspektrumot ölelnek át, melynek tükrében kutatásomhoz a kvalitatív, a kvantitatív, valamint az empirikus kutatási módszertant is igénybe kellett vennem.

Az 1. fejezetben a nemzetközi szabályozási környezet kerül fókuszba az értekezésem témájával kapcsolatos egyéb témakörök áttekintésével. A 2. fejezetben a vészhelyzeti bázisállomások alapjául szolgáló frekvenciatervezési metódusok szempontjai kerülnek vizsgálat alá. A 3. fejezetben a mobil hálózatok vészhelyzeti kapacitására vonatkozólag végzek analíziseket, valamint a hálózati konvergenciák relevanciáját fogom elemezni. A 4. fejezetben a mobil hálózatok lefedettségi problémáit vizsgálom a vészhelyzetből adódó szolgáltatás kiesések tekintetében, valamint a hálózatok lefedettségi erőforrásainak megosztása vonatkozásában. Az 5. fejezetben a kritikus infrastruktúrák és az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomások magyar jogszabályi környezetét tekintem át az esetleges hiányosságok feltárása érdekében.

1 VÉSZHELYZETI MOBIL KOMMUNIKÁCIÓ TERÜLETEINEK ÁTTEKINTÉSE

A fejezetben a vészhelyzeti mobil kommunikáció területei kerülnek fókuszba, beleértve a világszerte tapasztalható katasztrófák tendenciáit, a terrorizmus és háborúk statisztikáinak vizsgálatát, valamint a mobil hálózatok vészhelyzetben történő esettanulmányait. Kitérek továbbá a vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos nemzetközi szabályozásokra és projektekre, illetve tárgyalom a krízishelyzetek esetén használatos műszaki megoldásokat a vészhelyzeti kommunikáció vonatkozásában.

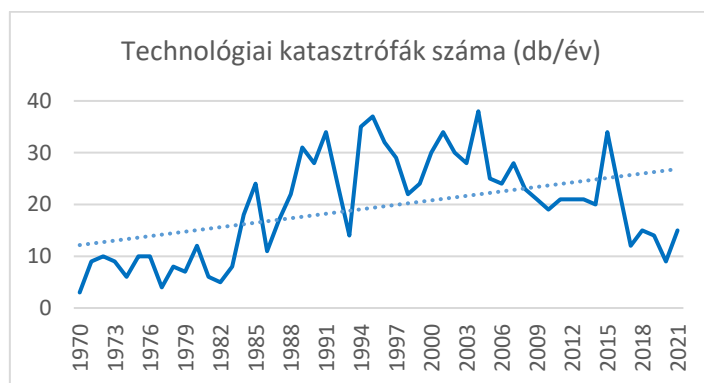
1.1 Hálózati sérülékenységek krízishelyzet esetén

A bázisállomások üzembiztonságát veszélyeztető tényezők statisztikai adatainak elemzésével arra kívánok választ kapni, hogy az egyes kategóriák milyen irányvonalat mutatnak, és melyek azok, amelyek a mobil kommunikációra – a bázisállomások sérülésén keresztül – hatással lehetnek.

1.1.1 Katasztrófák, terrorizmus és háborúk

A globális felmelegedésnek köszönhetően a természeti katasztrófák száma emelkedik, így ezzel a katasztrófatényezővel is egyre inkább számolni kell a mobil hálózatok sebezhetőségének tekintetében.

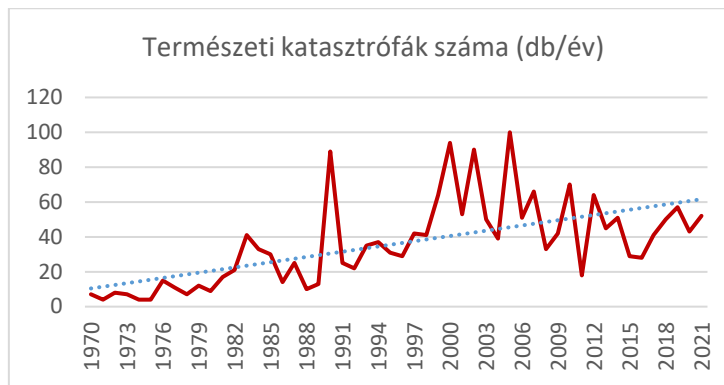
Az alábbiakban a természeti és technológiai katasztrófákra, valamint a terrorista és háborús eseményekre vonatkozó, az elmúlt fél évszázadot magába foglaló statisztikákat tekintem röviden át, melybe minden olyan esemény regisztrálásra került, amely 10 vagy ennél több halálessel járt és legalább 100 személyt érintett (sérülés vagy otthontalanná válás). Elsőként az Európában bekövetkezett technológiai katasztrófák statisztikáit elemzem [4][5].



1. ábra Technológiai katasztrófák száma Európában (db/év) [5]

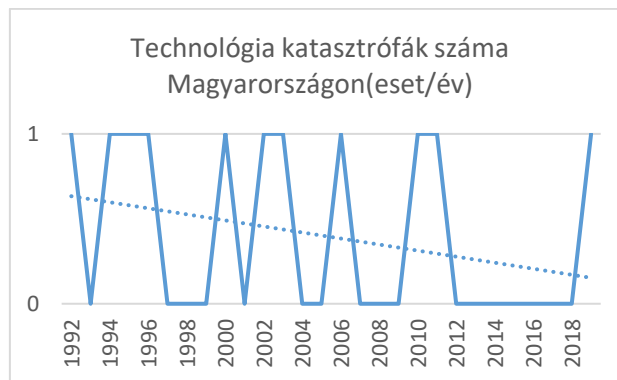
Az 1. ábra szerint a technológiai katasztrófák száma 1970 óta – időszakos változással –, de folyamatos növekedést mutat vélhetően az egyre kiterjedtebb ipari terjeszkedésnek köszönhetően. Nagy átlagban a trendvonal (az ábrán szaggatottan jelölve) emelkedést predesztinál a jövőt illetően az utóbbi pár évben tapasztalható időszakos csökkenő tendencia ellenére.

A természeti katasztrófák száma ennél jóval meredekebb emelkedést jelez, néhány kiugróan magas értékkel. A 2. ábra statisztikája vélhetően összefügg a globális felmelegedés hatásaival, a trendvonal itt is folyamatos emelkedést mutat.



2. ábra Természeti katasztrófák száma Európában (db/év) [5]

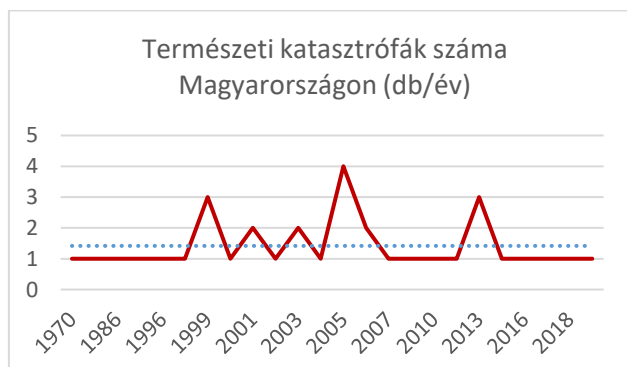
Magyarországot is vizsgáltam a statisztikák tekintetében a katasztrófákhoz kapcsolódóan. Technológia katasztrófából összesen 1-et regisztráltak (3. ábra) azokban években, ahol az elhunytak száma nagyobb, mint nulla.



3. ábra Technológiai katasztrófák száma Magyarországon [5]

A trend vonatkozásában kismértékű csökkenés látszik.

A természeti katasztrófák száma stagnált az utolsó időszakban tekintetben, mely során évente egy ilyen kategóriájú eseményt regisztráltak (4. ábra).



4. ábra Természeti katasztrófák száma Magyarországon [5]

A fenti természeti katasztrófák közül kiugró halálos áldozati számmal a 2007-es és 2018-as év járt, melyet a nyári extrém magas hőmérséklet okozott. A trend általánosságban itt stagnálást mutat.

Az ismertetett európai és magyarországi események során bekövetkezett katasztrófák 80%-a olyan jellegű, amely a bázisállomások üzemfolytonosságára hatással lehet, esetenként azok teljes kiesését is

eredményezheti. Ilyen természeti csapások például az aszály, a földrengés, az árvíz vagy a szélsőséges erősségű szélviharok. Katasztrófavédelmi helyzetekben a mobil kommunikációs hálózatok üzemképessége rendkívül fontos, hiszen a segélykérés, a tájékoztatás és a mentési munkálatok hatékonysága ezekben az esetekben meghatározó.

A mobil hálózatokat érintő terrorista cselekményeket több csoportba lehet sorolni. A terroristák egyrészt kommunikációs platformként vehetik igénybe a hálózatot, másrészt pedig azon keresztül vagy az elleni támadással okoznak károkat. A hálózatokat érintő kibertámadás egyre elterjedtebb beavatkozási módszereknek számít. Ilyenkor az elkövetők eltulajdonítják, manipulálják vagy hozzáférhetetlenné teszik a rendszerben tárolt információkat és adatokat. A hálózatok elleni fizikai támadások során (pl. robbantás) pedig az infrastruktúra elemei válhatnak részlegesen vagy egészében működésképtelenné.

A robbantásos terrorista merényletek általában nem közvetlenül a távközlési infrastruktúrák elemei ellen irányulnak, de több esetben is súlyos rongálódást, vagy teljes működésképtelenséget okozhatnak (gondoljunk pl. a 2001-es WTC tornyok elleni támadásra New Yorkban). Ha a támadás nem okoz közvetlen fizikai sérülést a távközlési infrastruktúrában, a merényletet követően kialakult pánikhelyzet és információszerezési kényszer miatt a hálózatok betorlódnak, ami a szolgáltatás kiesésével is járhat, mely közvetetten további emberéleteket követelhet [6].

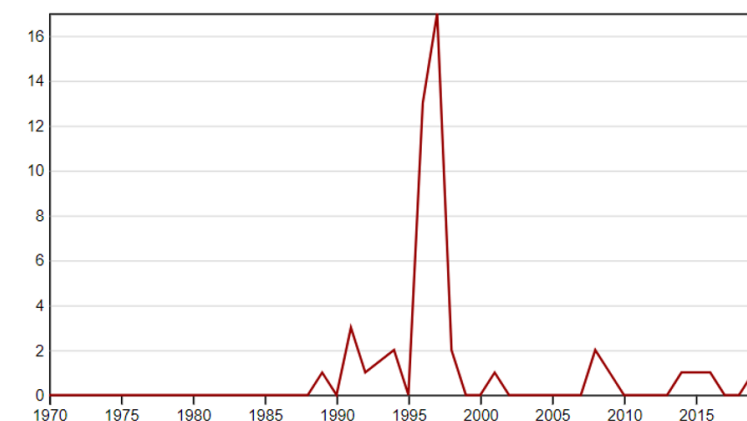
A világstatisztika szerint (5. ábra) a terrortámadások száma egy hatalmas kiugrás után 2013 óta (16000 esemény/év) csökkenő tendenciát mutat, a legfrissebb publikált adatok szerint (2019) a statisztika hozzávetőlegesen 8000 esemény/év körül mozgott [7].



5. ábra A terrorcselekmények statisztikai adatai világszerte [7]

Magyarországon az 1989 óta regisztrált terrorcselekmények kapcsán összesen 47 db biztonsági eseményt regisztráltak, melyek 4 halálos áldozattal és 17 sérülttel jártak. A statisztikát a 6. ábra mutatja be [7].

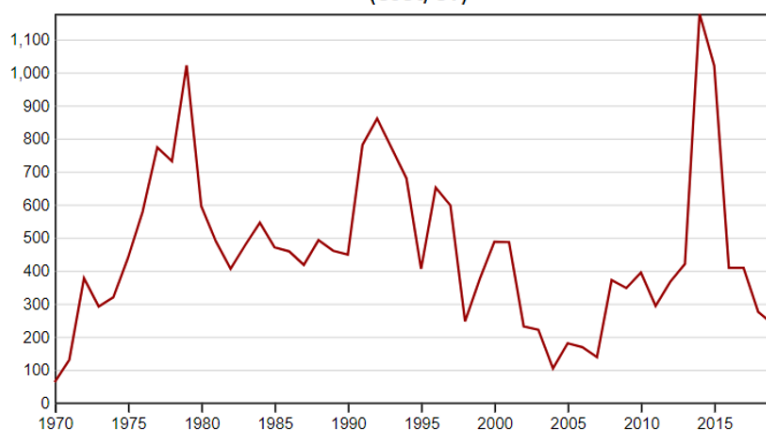
Terrorcselekmények száma Magyarországon
(eset/év)



6. ábra Magyarországi terrorcselekmények statisztikai adatai [7]

A kelet és nyugat-európai régióban elkövetett terrorista cselekmények száma (7. ábra) az 1992-es és 2005-ös év között fokozatosan csökkent (ugyanakkor időközönként ingadozóan változott), 2005-höz képest 2020-ra viszont ez a mutató ismét időszakosan növekedni kezdett, majd 2014-ben tetőzött (kb. 1200 esemény/év). A 2019-es utolsó publikált adat szerint a kelet és nyugat-európai térségben megközelítőleg 250 terrorcselekményt követtek el [7].

Terrorcselekmények száma Kelet és Nyugat-Európában
(eset/év)



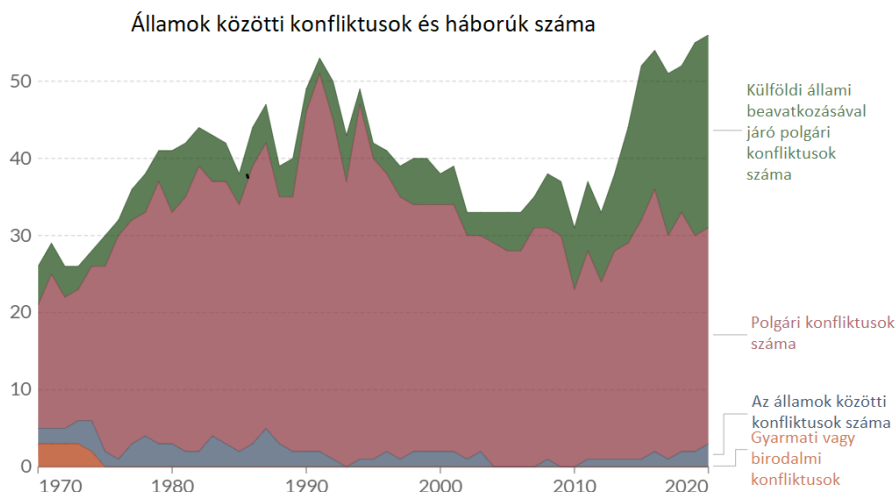
7. ábra A kelet és nyugateurópai terrorcselekmények (köztük Magyarország) [7]

Az Európai Unióban történt terrorcselekmények vonatkozásában a 2020-as évre is rendelkezésre állnak adatok. A 2020-as évben 57 terrortámadási kísérletet hajtottak végre az EU területén (sikeres és elhárított cselekményeket beleértve), mely során 21 haláleset és 54 sérülés történt, 2019-ben 55 esetet regisztráltak, mely 10 halálozással és 27 sérüléssel járt [8].

A robbantásos merényletek, melyek a mobil hálózatok és bázisállomások szempontjából az egyik legveszélyeztetőbb terrorcselekményi tényező (a fizikai sérülés esélye miatt), az elmúlt években visszaszorulni látszottak, ellenben ez a covid járvány okozta bezárásokból is adódhat (bevásárlóközpontok, stadionok, templomok stb.) [9].

A háborúk és fegyveres konfliktusok során hasonló felhasználási szokások és működési problémák tapasztalhatóak, mint a terrortámadások, természeti vagy technológia katasztrófák esetén. A háborús halálesetek abszolút száma 1946 óta csökken.

A következő diagram (8. ábra) a háborúk és fegyveres konfliktusok számát mutatja be. A folyamatban lévő konfliktusok száma minden évben emelkedett, azonban a növekedés csak az államokon belüli polgári konfliktusokra volt jellemző.



8. ábra Államok közötti konfliktusok és háborúk száma [10]

Az értekezés befejezésének időpontjában sajnálatos aktualitás az orosz-ukrán háború. A konfliktus rámutatott arra, hogy a mobil bázisállomások kiiktatása is támadó katonai célkitűzés lehet azért, hogy az elektronikus kommunikációt részlegesen vagy teljesen hatástalanítsák.

1.1.2 Esettanulmányok

2019. szeptember 1-jén csapott le az osztályozás szerinti legerősebb kategóriájú Dorian hurrikán a Bahamákön található Abaco szigetekre, mely a valaha volt addigi legerősebb trópusi ciklon volt, mindezidáig az ország történetének legsúlyosabb természeti katasztrófájaként tartják számon. A 295 km/h-s csúcsebességgel pusztító vihar szinte a teljes mobilhálózatot megbénította a térségben, a bázisállomások antennái és kültéri berendezései hatalmas károkat szenvedtek, de a transzport hálózatok is sérültek. A sűrűbben lakott területeken a mobil szolgáltatást idővel helyre tudták állítani, de a kevésbé lakott részeken a kommunikáció teljesen ellehetetlenült, mely a mentési és helyreállítási munkálatoknak is gátat szabott. Az érintett területek kommunikációjának helyreállítása az ITU vészhelyzeti telekommunikációval foglalkozó csoportjának segítségével valósulhatott meg, amely a katasztrófa bekövetkeztét követő rövid időn belül üzembe helyezte a krízishelyzet esetére fenntartott műholdas kommunikációs berendezéseit, továbbá ellátta a lakosságot a hálózatok igénybevételéhez szükséges terminálokkal, amíg a létfontosságú távközlési kapcsolatok helyreállítása meg nem történt. Ennek köszönhetően a katasztrófa sújtotta lakosság számára újra biztosítottá vált a segélyhívás lehetősége, valamint a kormányzati szervek tájékoztatása a keresési és mentési műveletek, valamint humanitárius tevékenységek megkezdése érdekében. A Bahama-szigetek ezt követően ratifikálta a Tamperei

egyezményt, melynek keretében katasztrófa esetén a tagországok biztosítják a távközlést érintő problémák felszámolásához a szükséges személyzetet, az eszközöket és felszerelést, a szükséges oktatást, az átviteli hálózatot, továbbá a távközléshez szükséges minden egyéb erőforrást [6][11].

2016. március 22-én több robbantásos merénylet történt Brüsszelben, kettő a repülőtéren, egy pedig a Maelbeek metróállomáson. Ennek során több tucatnyi ember vesztette életét, illetve a sebesültek száma is 200 felett volt. Az események okozta pánikhangulat eredményeképpen a felhasználók – segítségkérés és tájékoztatás céljából – egyszerre kezdtek forgalmazni, melyek egy része segélyhívás kezdeményezésére, másik hányada pedig a területen kívül tartózkodók tájékoztatásra irányult. A szolgáltatók vészhelyzeti területét kiszolgáló cellák a több ezer egyidejű hívásterhelés következtében rövid időn belül nagy arányú torlódást szenvedtek el, mely főként a hívás és adatforgalmazás sikerességi arány drasztikus degradációját jelentette. A magas forgalom túlmutatott a rendszerek által biztosítható kapacitáson, ezért a szolgáltatók viszonylag rövid időn belül reagáltak és hálózatoptimalizálói módszerekkel próbáltak beavatkozni, hogy a megnövekedett kapacitást kezelni tudják. Továbbá a közösségi oldalakon kérték a felhasználókat, hogy hanghívás helyett az SMS szolgáltatást vegyék igénybe, valamint az adathálózatot alkalmazó közösségi oldalak (Twitter, Facebook), vagy üzenetküldő applikációk segítségével kommunikáljanak (Viber, WhatsApp, Telegram stb.), csökkentve ezzel a beszédcsatornák leterheltségét és a sürgős segélyhívások lehetővé tételét. A hálózati torlódások a fenti törekvések ellenére továbbra is fennálltak, így a hálózatüzemeltetőknek és a hatóságoknak egyéb intézkedéseket kellett tenniük a probléma enyhítésére. A repülőtér és annak környezetében elérhető Wi-Fi hotspotokat 24 órán át bárki számára ingyenesen és jelszó megadása nélkül elérhetővé tették, mérsékelve ezzel a mobilhálózatokon átmenő adatforgalmat. A fenti intézkedés ellenére a magas kihasználtság miatt a szolgáltatások és hálózatok elérhetősége még 8 óra elteltével is akadozott, a napi forgalom sokszorososa volt az év legforgalmasabb napjához viszonyítva mind a beszédhívások, mind pedig az adatforgalom és küldött SMS-ek vonatkozásában [12].

2022 év elején érte kibertámadás az egyik piacvezető portugál mobil operátort az esti órákban, a szolgáltató 4,7 milliós ügyfélbázissal rendelkezik. A támadás célpontjában olyan mobil gerinchálózati elemek voltak, amelyek minden technológiát érintettek (2G-5G). A hackertámadás útján történő beavatkozás jelentős hatással bírt és teljes hálózati leállást eredményezett a távközlési cég szolgáltatásaiban, milliókat szakítva el ezzel a kommunikáció lehetőségétől. A beavatkozást követően a folyamatban lévő hanghívások azonnal megszakadtak, továbbá az adatkapcsolatok is eldobásra kerültek, a felhasználók a kommunikáció lehetőségétől teljesen elszigetelődtek. A probléma hosszú időn keresztül fennállt, a szolgáltató elsőként a 3G hálózat a hangforgalmát és az SMS szolgáltatásokat tudta helyreállítani, de az adatkapcsolatok továbbra is akadoztak. Az adatkommunikációt végül másnap reggel sikerült részlegesen újra elérhetővé tenni, ugyanakkor a 4G és 5G hálózatok továbbra is elérhetetlenek voltak, ezeket a technológiákat csak a támadást követő közel 20 óra elteltével sikerült végül helyreállítani.

1.2 Nemzetközi szabályozások és projektek

A Nemzetközi Távközlési Unió (ITU) egy globális szabványügyi szervezet, melynek számos munkacsoportja foglalkozik a veszélyhelyzeti kommunikáció szabályozási kérdéseivel, és szabályrendszerek megalkotásával. Az Európai Távközlési Szabványügyi Intézet (ETSI) az információs és kommunikációs technológiák Európai Unión belüli regionális szabályozási feladatai látja el, az ITU vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos törekvéseiben pedig az ETSI EMTEL csoportja (Emergency Telecommunication) vállal jelentős szerepet. A kritikus infrastruktúrákra vonatkozó szabályozási feladatokat pedig a nemzetállamok látják el az Európai Unió irányelvei szerint, melynek keretében definiálva van minden nemzeti vagy európai létfontosságú kritikus infrastruktúrákkal kapcsolatos kötelezettség, köztük a vészhelyzeti szempontok is. Mindhárom tevékenységet röviden bemutatom a következőkben.

1.2.1 ITU vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos törekvései

Az ITU különböző bizottságai olyan ajánlásokat készítenek, amelyek segítségével az országok megalapozhatják a távközléssel kapcsolatos jogszabályok megalkotását az ETSI szervezeteinek közvetítésével. Az ITU a vészhelyzeti kommunikáció kérdéskörével egyre mélyebben foglalkozik, ugyanis a szervezet várakozásai szerint a téma egyre nagyobb jelentőséggel fog bírni a jövőben. Ennek egyik szempontja, hogy a világ népessége a következő 30 évben várhatóan 2 milliárddal, a 2019-es 7,7 milliárdról 2050-re 9,7 milliárdra fog nőni. Másik aspektus szerint pedig az éghajlatváltozás, a globális felmelegedés tovább fogja növelni a szélsőséges időjárási események súlyosságát, illetve a természetben előforduló veszélyeket (beleértve a földrengéseket és a szökőárakat) egyes területek lakosságát még sebezhetőbbé téve ezzel. 280 millió ember kerülhet veszélybe csak a tengerszint emelkedése miatt. A globális hőmérséklet az iparosodás előtti szinthez képest megközelítőleg 2°C-kal emelkedett, a fejlődő szigetországok lakosságának mintegy negyede él a tengerszint alatt öt méterrel vagy annál is alacsonyabban [13]. Egyre több a bizonyíték utal az ember által okozott éghajlatváltozás és a szélsőséges időjárási események közötti kapcsolatra is, melynek humanitárius jelentősége felbecsülhetetlen mértékűt ölt. A világ lakosságának mintegy fele nagymértékben ki van téve a súlyosbodó éghajlati hatásoknak, melyek közül azok, akik elszigetelt területeken élnek, nem férnek hozzá a vészhelyzeti kommunikációhoz szükséges alapvető információs és kommunikációs eszközökhöz sem [14].

Az ITU-T katasztrófavédelmi törekvéseit illetően 2019-ben Budapesten került aláírásra a Válság Összeköttetés („Crisis Connectivity”) együttműködés. Ez egy globális hálózat, amely a katasztrófák sújtotta területek helyreállításának segítésére jött létre a vészhelyzeti kommunikáció érdekében, melynek keretben műholdas alapú rendszerek segítségével biztosítják a krízishelyzet által érintett területek kommunikációját, amennyiben katasztrófa következtében a helyi hálózatok nem képesek kiszolgálni a felhasználókat. A mobil kommunikáció megléte elengedhetetlen a mentési munkálatok koordinációjához, minden esetben sürgősen szükség van a megbízható távközlési kapcsolatok helyreállítására, valamint a katasztrófát megelőző figyelmeztetések („early warning”) és riasztások megtételére a veszélyhelyzetben

érintett felhasználók körében. Az ITU által biztosított eszközök a világ minden pontján, sűrűn lakott és ritkán lakott területeken egyaránt telepíthetőek, képesek a hang és adatszolgáltatás biztosítására, továbbá alkalmasak a rádiófrekvenciás spektrumban kiosztott különböző frekvenciák alkalmazásával is kommunikálni egymással. A mobil és energiaellátási hálózatok gyakran sérülnek, vagy teljes egészében megsemmisülnek a katasztrófális időjárási események miatt (pl. heves áradások, hurrikánok stb.), ezekben az esetekben a műholdas kommunikáció egy lehetséges szcenárió lehet a vészhelyzeti kommunikációra. [15]. A műholdas hálózatok üzembiztonsága megbízható – révén, hogy a légkörön kívül működnek – nincsenek kitéve az időjárás viszonytagságainak, illetve távoli, mobil hálózatokkal nem lefedett területeken is használhatóak, a rendszereket csak az erre a célra készült egyedi műholdas terminálokkal lehet igénybe venni. A műholdas technika széles körben elterjedt szabványokra támaszkodik, a berendezések és terminálok könnyen beszerezhetőek, az interoperabilitás és a megbízhatóság tehát biztosítható [13].

Az ITU-R olyan műsorszóró rendszereket is ajánl, mely szintén fontos eszköz lehet a katasztrófhelyzetekben és a katasztrófa utáni szituációkban a lakosság kiértesítésére. Ez pl. rövidhullámú műsorszórás segítségével történhet, amennyiben a helyi vagy regionális kommunikációs és információs hálózatok megsemmisülnek vagy túlterhelté válnak, illetve, ha a katasztrófa által érintett lakosság teljes áramkimaradásban szenved. A 2010-es haiti és a 2011-es kelet-japán földrengés okozta pusztítást követően használták a technológiát. Az ITU-R BS.2107 ajánlásban említett Nemzetközi Rádió a Katasztrófaelhárításért (IRDR) projekt célja, hogy globális platformot kínáljon a földfelszíni vezeték nélküli rádiószolgáltatás tekintetében.

Az ITU fontos szerepet játszik a telekommunikációs hálózatok kockázatsökkentésében is a katasztrófa vonatkozásában és az annak kezelésében betöltött kritikus fontosság hangsúlyozásában. Az ITU arra ösztönzi az országokat, hogy a katasztrófákra való előzetes felkészülést nemzeti és a helyi önkormányzatok hatáskörében tegyék meg, valamint tervezzék meg az esetleges válságkezelés lépéseit a vészhelyzeti események bekövetkeztét uralkodó pánik elkerülése érdekében. Az ITU ehhez minden segítséget felkínál, továbbá a vészhelyzeti távközléssel kapcsolatos partnerségekbe történő belépést követően segíti az országok ellenálló képességének növelését és felkészítését megvalósítani. Ennek keretében a tagállamoknak a katasztrófa kezelés tekintetében biztosítja a szükséges oktatást és segíti a nemzeti sürgősségi távközlési tervek kidolgozásának megvalósítását (NETP). Korai figyelmeztető és megfigyelő rendszerek felállításában is támogatást nyújt, és katasztrófa esetén biztosítja a sürgősségi távközlési berendezéseket is.

A krízishelyzetek során (azt megelőzően, alatt és azt követően) kritikus fontosságú az információk időben történő terjesztése a katasztrófa hatásainak enyhítése érdekében. Az ITU rádiótávközlés területén végzett tevékenységei felbecsülhetetlen jelentőségűek a katasztrófavédelem vonatkozásában, a rádiófrekvenciás spektrum hatékony és összehangolt alkalmazásával. A rádiótávközlési rendszerek használatára vonatkozó szabványok és iránymutatások kidolgozása révén megkönnyítik az előrejelzést, az észlelést és a riasztást.

Az ITU határozatokat, műszaki szabványokat és ajánlásokat dolgoz ki annak érdekében, hogy segítse a tagállamok távközlési szolgáltatásainak és rendszereinek katasztrófakockázat-csökkentési törekvéseit, a katasztrófavédelem és humanitárius segítségnyújtás céljából történő felhasználásában. Az ITU egyik fő irányvonala szerint 2023-ra minden országnak rendelkeznie kell nemzeti vészhelyzeti távközlési tervvel a nemzeti és helyi katasztrófakockázat-csökkentési stratégiák részeként [13][14][16][17][18][19].

1.2.2 ETSI – EMTEL vészhelyzeti kommunikációval kapcsolatos törekvései

Az ETSI EMTEL-bizottság felelős a vészhelyzeti kommunikációs szolgáltatásokra vonatkozó európai követelmények kidolgozásáért és rögzítéséért. Ezen túlmenően az EMTEL olyan témákkal is foglalkozik, mint a pl. helymeghatározás (AML), vagy a 112-es segélyhívószám következő generációja (NG112), amelyek lehetővé teszik, hogy a segélyhívó központok ne csak hangot, hanem helymeghatározási információkat, valós idejű szöveges üzeneteket, fényképeket, videohívásokat és egyéb adatokat is fogadhassanak. Továbbá a IoT-eszközök vészhelyzetben történő bevonásával is foglalkoznak, amely rendszereken keresztül működtethetők lesznek pl. a lakossági riasztások [20].

Az ETSI a műholdas kommunikációs rendszerek szabványosításán is dolgozik, beleértve a szélessávú műholdas vészhelyzeti kommunikációt is, de pl. úrkutatási célokra (ETSI-SES) is folytat ilyen irányú tevékenységeket [20].

További fejlesztései kiterjednek a TETRA hálózatra, amely egy olyan zárt célú mobil hálózat, amely a készenléti szervezetek kommunikációs céljaira szolgál (pl. rendőrség, mentőszolgálat, tűzoltóság, biztonsági szolgálatok stb.). A TETRA Magyarországon is működik, és országos kültéri és beltéri lefedettséggel rendelkezik [20].

Az ETSI részt vesz a harmadik generációs partnerségi projekt (3GPP) számos 3G/4G/5G-t érintő, közbiztonsággal kapcsolatos fejlesztésében, mint pl. az elsőbbségi szolgáltatás, amelynek célja, hogy a nemzetbiztonsági és katasztrófavédelmi intézkedéseket végző felhasználók prioritást élvezzenek más publikus előfizetőkkel szemben a kereskedelmi szolgáltató hálózatán, mely különösen fontos nagy forgalom és hálózati torlódások esetén. Továbbá érintenek olyan projekteket, mely a hatósági személyek részére csoportos hanghívást tesznek lehetővé, illetve a lakossági figyelmeztető rendszert (SMS vészhelyzeti értesítő rendszer, bővebben 3.1-es fejezet) [20].

A 3GPP szabványokat dolgozott ki az ún. eCall rendszerre vonatkozólag is, amely a járműbe épített segélyhívó szolgáltatást (112) teszi lehetővé. Közúti baleset esetén ezzel a rendszerrel egy gombnyomással automatikusan elküldhető a baleset a pontos helyszíne, a baleset időpontja, a jármű rendszáma és haladási iránya [20].

Az ETSI vészhelyzeti kommunikációval foglalkozó szabványait is áttekintettem. A szervezet kiemelt fókusz helyez a vészhelyzettel érintett területek megfelelő lefedettséggel és szolgáltatás minőséggel való kiszolgálására. Definiálja a mobil hálózatokra vonatkozó mutatókat, mint pl. a hívásfelépítési idő, vagy szolgáltatásminőség stb. Felhívja a figyelmet az adatforgalom biztosításának fontosságára, a megfelelő adatátviteli sebesség mellett, a késleltetés minimalizálására, az adathálózaton keresztül bonyolított hang

és videóforgalom folyamatos biztosítására, valamint a hálózatok lefedettség hiányából okozott problémák (adat és csomagvesztés) csökkentésére. Az ETSI szabályrendszere alapján a vészhelyzeti szervek tagjai közötti beszédkommunikáció, továbbá adatszolgáltatáson keresztül zajló információk cseréje, mint pl. képek, fájlok, videók küldési kiemelt fontosságú vészhelyzetben. A válsághelyzet okozta többletforgalom torlódásokhoz vezethet a teljes hálózatban vagy annak egy részében. Az ilyen helyzetre az ETSI követelményeket is meghatároz arra vonatkozólag, hogy a hálózatüzemeltető szakértőknek minden olyan intézkedést kötelesek megtenni, amellyel a hálózati torlódások elkerülhetőek. Az ETSI ajánlásai közé tartozik az adaptív forgalomirányítás is, amellyel a rádiós csatornák és a forgalom dinamikus konfigurálása és irányítása megtehető. Ezzel az eljárással a vészhelyzeti felhasználók forgalma valós időben optimalizálható, prioritizálható, pl. azokra a felhasználókra vonatkozólag, akik a vészhelyzeti kommunikáció elérhetőségétől már elestek, vagy meghatározható a vészhelyzet jellegéhez igazodó forgalomirányítás (hang vagy adatszolgáltatás prioritizálása, vagy a kiszolgálható felhasználó szám emelése az adatátviteli sebesség csökkenése árán). Az ETSI arra ösztönzi a szolgáltatókat, hogy a hálózatokat úgy méretezzék a tervezés során, hogy azok a vészhelyzeti „csoportok” extrém forgalmát, akár kis területre koncentrálva is kezelni tudják [21][22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][32].

1.3 Európai Unió szabályozási környezet a kritikus infrastruktúrákra vonatkozólag

A 2001. szeptember 11-i terrortámadások következtében Európában is jóval nagyobb hangsúly került a kritikus infrastruktúrák védelmére. Az első jelentős szabályozás a kritikus infrastruktúrák azonosításáról, kijelöléséről és védelmük fejlesztésével kapcsolatos 2008. december 8-i 2008/114/EK (ECI) az európai kritikus infrastruktúrák azonosításáról és kijelöléséről, valamint védelmük javítása szükségességének értékeléséről szóló irányelv volt [33].

Kritikus infrastruktúrának nevezzük azon rendszereket és eszközöket, melyek létfontosságú szerepet játszanak a társadalmi szerepkörök ellátását illetően, amelyek megzavarása vagy megsemmisítése ellehetetleníti a tagállamok a gazdasági, egészségügyi, szociális és nemzetbiztonsági feladatainak folyamatos ellátását. Az „európai kritikus infrastruktúra” vagy „ECI” olyan kritikus infrastruktúra, amelynek megzavarása vagy megsemmisítése súlyos hatással lenne legalább két tagállamot érintően [33].

A 2001-es new york-i terrortámadásokat követően az Európai Tanács célul tűzte ki egy ajánlás előkészítését a Tagországok számára arra vonatkozólag, hogy az uniós országok kritikus infrastruktúráinak vészhelyzeti felkészültségét javítsák. Az Európai Bizottság 2005. november 17-én fogadta el az ún. Zöld könyvet, amelyet a kritikus infrastruktúrák sebezhetőségének csökkentésére és védelmére hoztak létre. Ennek folytatásaként 2005 decemberében elindult a kritikus infrastruktúrák védelmére vonatkozó európai program (EPCIP) a terrorizmus, valamint a természeti katasztrófák okozta veszélyek megfelelő kezelése és elhárítása érdekében. 2007 áprilisában az Európai Tanács átfogó tervet fogadott el a Tagországok felelősségét illetően, amely szerint a kritikus infrastruktúrák (ECI)

beazonosítására, védelmére vonatkozó felelősség az infrastruktúrák üzemeltetőit¹ terheli. Az egyes tagállamok infrastruktúráinak összekapcsoltságából és egymástól való függéséből adódóan egy nagyobb mértékű nemzeti szintű meghibásodás a tagállamok határain átívelő problémát generálhat, hatása számos ágazatot érinthetne. Az Unió ajánlás szerint az EPCIP együttműködésnek célja, hogy az ECI-k beazonosítását és kijelölését a tagállami jogszabályokkal összhangban szükséges kezelni. Az egyes ágazatok eltérő igényeket képviselnek, valamint különböző szakértői csoportokat érintenek, így a kritikus infrastruktúrák védelmére indított közös irányelv kidolgozása és megvalósítása kapcsán az egyes ágazatokra vonatkozó jellemzőket is figyelembe kell venni beleértve az Európai Unió tagállamai közti segítségnyújtási egyezményeket is [33].

Az ajánlás továbbá meghatározza, hogy az ECI-knek rendelkezniük kell ún. üzemeltetői biztonsági tervvel (OSP), mely magába foglalja az ECI-ket üzemeltető cégek kockázatelemzését, és az esetleg üzemeltetési problémákra adott megoldásokat. A tagállamok felelősségébe tartozik az OSP meglétének és minőségének felügyelete, és amennyiben nem teljesülnek ezek a feltételek, úgy a tagállamoknak kötelességében áll, hogy megtegyék a szükséges lépéseket és a megfelelő intézkedéseket [33].

Tovább mérföldkőnek tekinthető a 2016. július 19-ei Európai Parlament és a Tanács (EU) 2016/1148-as irányelve, a hálózati és információs rendszerek biztonságának az egész Unióban egységesen magas szintjét biztosító intézkedésekről. Ez tekinthető az első olyan teljeskörű közösségi szintű szabályozásnak az információbiztonsági területen, melynek célja, hogy a hálózati és információs rendszerek minél magasabb biztonsági szintet képviseljenek az Unión belül. Az irányelv alá tartoznak az alapvető szolgáltatásokat nyújtó szereplők, valamint az elektronikus hírközlési szolgáltatók csoportjai is [34][35].

A fenti irányelvek magyar jogrendbe való átültetésével a 5. fejezetben foglalkozom.

1.4 A kríziskezelés egyes lehetséges hálózati megoldásai

Rendkívüli események kapcsán a mobil hálózatok igénybevétele drasztikusan megváltozik, és az átlag felhasználói szám olyan mértékben növekszik meg, hogy a hálózatokban torlódás alakulhat ki. Ennek eredményeképpen a hálózat folyamatos paraméterezése mellett is lecsökken a hívás és adatforgalmazás kezdeményezésének sikerességi aránya, a kapcsolateldobás pedig emelkedik. Extrém igénybevétel esetén, mint pl. természeti vagy technológiai katasztrófa, terror vagy háborús cselekmény, elengedhetetlen, hogy a kommunikáció folyamatosan biztosítva legyen. Amennyiben ezek a vészhelyzeti események olyan területre lokalizálódnak, ahol nincs megfelelő rádiós lefedettség, úgy különböző megoldások jöhetnek számításba.

1.4.1 Vészhelyzeti kommunikáció biztosítása földi szolgáltatás kiesése esetén

A mobilszolgáltatások kiesése esetén három megoldással biztosítható a kapacitás pótlása: közvetlen műholdas kommunikációval, a légtérbe telepített repülő objektumokkal biztosított lefedéssel, vagy földi

¹ Az európai kritikus infrastruktúrák tulajdonosai/üzemeltetői: „azon jogalanyok, akik a beruházásokért és/vagy az ezen irányelv szerint ECI-nek kijelölt konkrét eszközök, rendszerek vagy azok részei napi működéséért és az azokba történő beruházásért felelősek.” [33]

ad-hoc telepítésű bázisállomásokkal. A jelenlegi műholdas technológiák költségesek és viszonylag kis sávszélességet biztosítanak. A másik megoldás az ITU ajánlásokban is támogatott ún. nagy magasságban üzemelő platformállomások (HAPS), melyek drónok vagy ballon alapú technológia segítségével biztosítanak lebegő bázisállomásokat a katasztrófák sújtotta területeken. A HAPS-ök képesek az LTE és az 5G szolgáltatás nyújtására is. Bizonyos helyzetekben a HAPS gyorsan alkalmazható a katasztrófa bekövetkezése utáni mentési és helyreállítási kommunikáció biztosítására, az átviteltechnika műholdas kapcsolaton vagy egy távolabbi földi gateway állomáson keresztül megoldott, az áramforrás pedig akkumulátorokkal és napelemekkel biztosítható. A technológia egyelőre még további fejlesztéseket igényel [13][36][37].

Új lehetőséget jelent a SpaceX Starlink² projekt, amelynek célja egy globálisan elérhető internet szolgáltatás megteremtése magas sávszélességgel és megfelelő válaszidővel. Az űrvállalat 2022 januárjáig 1900 db Starlink-et üzemelt be. A meglévő műhold technikáktól eltérően a Starlink műholdjai alacsony (LEO) vagy közepes (MEO) földkörüli pályán keringenek, amellyel biztosítható az alacsony késleltetési idő, a műholdak nagy száma miatt pedig lényegében a Föld minden pontján hozzáférhetővé válik a szélessávú internet szolgáltatást. A végcél szerint 42000 db műhold kerül majd beüzemelésre.

A várakozások szerint a rendszer 100 - 200 Mbps adatátviteli sebességet és hozzávetőlegesen 20 ms-os késleltetést (ami kb. megfelel a 4G hálózatokon mérhető válaszidővel) lesz képes biztosítani a föld bármely pontján [38][39].

1.4.2 Vészhelyzeti kommunikáció ad-hoc telepítésű mobil bázisállomásokkal

Amennyiben a vészhelyzeti kommunikációt a rádiós terminálok számára, mobil hálózatokon keresztül kell megvalósítani, úgy a katasztrófa sújtotta vagy egyébként is lefedetlen területeken az ad-hoc telepítésű speciális mobil bázisállomások telepítése jöhet számításba. Az új, zöldmezős bázisállomások létesítése hosszás folyamat, melyet tervezés, akvizíció és kivitelezés előz meg, azonban erre egy vészhelyzeti esemény során nem áll rendelkezésre elegendő idő. A mobil szolgáltatók ilyen esetben mozgatható mobil bázisállomásokat alkalmaznak, melyek általában az erre a funkcióra tervezett speciálisan átalakított teherautókkal vagy a helyszínen felállított tartóelemekre telepített antennákkal és berendezésekkel történik. Egy ilyen jármű rendelkezik a szolgáltatás nyújtásához szükséges hardverrel és szoftverrel, valamint a rádiós antennákat tartó teleszkópos kiemelő rendszerrel (mely kb. 5 – 40 m-ig terjedhet).

A mozgatható bázisállomások meglévő optikai hálózaton vagy mikrohullámú berendezésen keresztül kommunikálnak a Core hálózat elemeivel, tehát telepítésük és üzembe helyezésük sikeressége a transzport hálózat meglétének függvénye is. A lakott területektől távol vagy domborzatilag izolált helyeken az átviteltechnika biztosítása problémába ütközhet az optikai hálózat hiánya miatt, és ha ez mikrohullámú átjátszóállomások telepítését követően sem teljesíthető, akkor a bázisállomás létesítése meghiúsulhat. Szintén problémás, ha az ellátandó terület a teherautók számára nem megközelíthető helyre esik.

² Starlink a SpaceX által gyártott egyedi tervezésű műhold, mely az űrvállalat Falcon 9 típusú rakétái segítségével kerül felbocsátásra földkörüli pályára

További hátrány, hogy a mobil állomásnak el kell jutnia a helyszínig, mely jelentős időbe telhet, valamint az integráció megvalósítása szintén időigényes, így egy prompt vészhelyzetre adott gyors reakcióra vagy beavatkozásra ilyen formában sokszor alkalmatlan. Az ad-hoc telepítendő mozgó bázisállomás alkalmazhatósága inkább az előre tervezett kapacitásnövekedés kiszolgálására (pl. forgalmas tömegrendezvények stb.) optimális, vagy olyan lefedetlen területek átmeneti lefedésére, ahol a telepítéshez megfelelő idő áll rendelkezésre. Az ilyen jellegű állomások telepítésének minimális átfutási ideje 1-2 nap.

A fent említett okok miatt kritikus helyzetek esetén a guruló bázisállomások érkezéséig és beüzemeléséig automatikus és manuális hálózat optimalizálási módszerekkel lehetséges beavatkozni. Az értekezésemben ezekre a módszerekre szeretnék javaslatokat, megoldásokat adni.

Az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomás magyarországi szabályozási kérdéseivel a 5. fejezetben foglalkozom, melyet megelőzően a mobil bázisállomások technikai jellemzőit vizsgálom a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából annak érdekében, hogy e komplex problémakör műszaki hátterét feltárva elemezhessem a jogszabályi kérdéseket.

2 VÉSZHELYZETI BÁZISÁLLOMÁSOK FREKVENCIA TERVEZÉSE

A mobil hálózatok performanciájával szembeni elvárások egyre magasabbak az egyre növekvő felhasználói igényeknek köszönhetően, valamint mobil terminálok penetrációja miatt. A technológiák fejlődésének hála az egyre növekvő felhasználói igények kielégíthetőek. A rendelkezésre álló frekvenciaspektrum teljes egészében meghatározza, hogy egy a szolgáltató milyen lefedettséget és szolgáltatás tud biztosítani előfizetőinek, utóbbiba beleértve az elérhető maximális adatátviteli sebességeket is.

A mobil bázisállomások számossága és telepítésük sűrűsége az alkalmazott technológiától (2G-5G), a rendelkezésre álló frekvenciáktól és a kívánt beltéri lefedettség szintjétől függ. Minél magasabb a használt frekvenciatartomány, annál rosszabb a rádióhullámok szabadtéri terjedése, valamint annál nagyobb csillapítást szenved el a jel a tereptárgyakon és a különböző anyagokon való áthatolás során. Ezért magasabb frekvenciasávok alkalmazása esetén több bázisállomásra van szükség az országos lefedettség biztosításához [1][40].

2.1 A mobil szolgáltatásokhoz szükséges spektrum

Differens frekvenciasávok különböző szolgáltatásokra kerülnek allokálásra, mely alapvetően meghatározza egy adott mobil technológia lefedettségre és kapacitásra vonatkozó korlátait. Az élvonalbeli technológiák integrálása, illetve az egyre emelkedő felhasználói kapacitási igények tovább növelik a szélesebb frekvenciaspektrum iránti igényt [41]. A mobil operátorok által igénybe vett frekvenciák általában hosszútávra, körülbelül 20 éves időtávlatra bérelhetőek az állam által kiírt tenderek keretében. Magyarországon az LTE (4G) implementációt megelőzően 2014-ben került sor frekvenciaaukcióra,

melynek során 280 MHz sávszélességű spektrumot hirdettek meg. A megvásárolható frekvenciákat csomagokban hirdette meg az állam, az „A”, „B” és „C” blokkban 800 MHz-en, 900 MHz-en és 2600 MHz-en, a „D”, „E”, „F” blokkban 1800 MHz-en, míg a „G” blokkban 2600 MHz FDD, a „H” blokkban pedig 2600 MHz TDD került értékesítésre [42][43]. A 800 MHz-es sáv üresedése az analóg TV sugárzás lekapcsolásának volt köszönhető [44], ez a sáv a legjelentősebb eszmei értékű olyan tekintetben, hogy a rádiós jelek terjedése sokkal előnyösebb ebben a sávban, mint magasabb tartományokban. Az aukció során a szolgáltatók 20 éves bérleti jogot szerezhettek meg az említett frekvenciasávokra, elfogadva ezzel az állam által szabott kritériumokat is, amely előírta például, hogy az LTE szolgáltatást 60 hónapon belül az ország lakosságának 96%-a részére, területének pedig legalább 90%-án elérhetővé kell tenni. A mobil szolgáltatást korábban is nyújtó operátorok mindegyike részesült a 800 MHz-es, a 900 MHz-es és a 2600 MHz-es frekvenciásávból. Az alsó (800 MHz és 900 MHz) és a felső tartomány (2600 MHz) is jelentős szerepet játszott az LTE szolgáltatás kiterjesztésében, de a 800MHz-es sáv meglete elengedhetetlen volt az országos lefedettség (elsősorban vidéki területeken történő) kiépítésének sikerességében. A 2014-es frekvencia aukció mérföldkőnek számított a hazai mobil távközlés életében, mely hosszútávra meghatározta a vezeték nélküli szolgáltatást nyújtó vállalatok stratégiáját.

A következő frekvenciapályázat 2019 IV. negyedévében került sor [45]. A pályázat fő célja a digitális gazdaság fejlődésének elősegítése volt az 5G szolgáltatásra alkalmas frekvenciaspektrum értékesítésével, valamint az 5G kiépítés lehetőségének előteremtése [46] [47]. További célja volt az árverésnek, hogy a szolgáltatókat a rádióspektrum hatékonyabb felhasználására ösztönözzék [48]. A hatály kiterjedt az elérhető adatátviteli sebesség jelentős növelésére és a hálózatra csatlakoztatott eszközök (terminálok, intelligens berendezések, érzékelők stb.) valós idejű kommunikációjának biztosítására is. A fenti célkitűzéseken túlmenően a pályázat az Európai Unió azon törekvését is szolgálta, amely szerint 2021. december 31-ig meg kellett tenni minden szükséges lépést az 5G-hez szükséges spektrum felszabadítása érdekében, tehát a 694-790 MHz-es és a 3400-3800 MHz-es sávot a mobilszolgáltatások számára használhatóvá kellett tenni [49][50][51][52].

Az új spektrumot 15 évre lehetett megpályázni, melynek keretében 700 MHz-es, 2100 MHz-es, 2600 MHz-es és a 3600 MHz-es sávra lehetett licitálni. A 700 MHz-es és a 3600 MHz-es sávok a mobilszolgáltatások szempontjából új frekvenciáknak minősültek. A 700 MHz-es frekvenciasáv a földfelszíni digitális televíziós műsorszórás 2020 harmadik negyedévében történő lekapcsolását követően vált elérhetővé, a 3600 MHz-es sáv pedig a helyhez kötött műholdas szolgáltatások lekapcsolása miatt szabadult fel, mely frekvenciát 2020 első negyedévében vehették át a mobil szolgáltatók. A frekvenciablokkok szélességét az 1. táblázat szemlélteti [53][54].

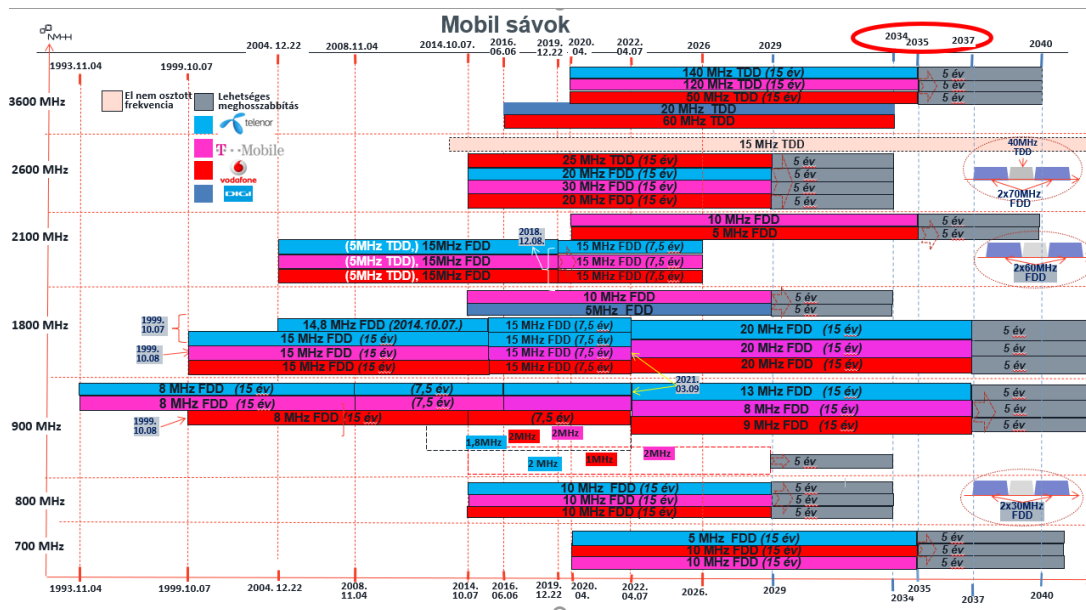
1. táblázat: A 2020-as frekvenciaaukción pályázható sávjai (Forrás: saját szerkesztés):

Frekvenciasáv	A kínált frekvenciák DL+UL	
700 MHz	2x25 MHz (FDD)	50 MHz
2100 MHz	2x15 4MHz (FDD)	30 MHz
2600 MHz	2x15 MHz (FDD)	15 MHz
3600 MHz	1x310 MHz (TDD)	310 MHz

Az 5G technológia telepítése 2020-ban kezdődött Magyarországon, ez részben a 4G rádión keresztül üzemelő 5G DSS technológiát jelentette, amely a már kiépített 4G sávban működik, másrészt az újonnan integrált a 3,5 GHz-es sávban működő 100 MHz-es vivőszélességgel üzemelő non stand-alone 5G formájában valósult meg. A DSS technológia a vivőszélességből adódóan (10-20 MHz) nem nyújt olyan performanciát, amire a 3,5 GHz-es sávban működő 100 MHz-es vivőszélességű 5G képes (non-standalone rádió, később pedig a stand-alone technika teljes 5G teljesítménnyel) [3]. Az UMTS hálózat vonatkozásában is várható frekvenciafelszabadítás, ugyanis 2023 év végéig várhatóan a magyarországi szolgáltatók lekapcsolják ezt a technológiát, így ezek a frekvenciasávok (900 MHz és 2100 MHz) 4G és az 5G szolgáltatásokra lesznek a átcsoportosíthatóak [55].

A 700 MHz-es tartomány lefedő rétegnek minősül, ezért a 800 MHz-es spektrum kapacitáserősítő sávjának is tekinthető. A 700 MHz-es sávon elérhető rádiós beltéri lefedettség közel azonos a 800 MHz-es sávon biztosíthatóval, mindkét spektrum alkalmas tehát országos és beltéri lefedettség kiépítésére. A 3600 MHz-es frekvenciatartományban (5G középsávok) a rádióhullámok szabadtéri csillapítása jóval nagyobb, illetve a tárgyak és anyagok csillapítása is jelentős ezen a sávon, ezért az 5G implementációja a jelenleginél struktúrájánál jóval sűrűbb bázisállomás telepítést kíván meg a lefedettség kiterjesztésének igénye esetén [56][57]. A 3600 MHz-es frekvenciatartomány alkalmazása főképpen kültéri szolgáltatások biztosítására alkalmas, beltéri lefedettségre nem [58]. Az 5G által használt magas frekvenciatartományt – a sűrűbb bázisállomás létesítéseken felül – például az aktív antennák beamforming feature-ének alkalmazásával lehetséges tovább kompenzálni [59]. Ez a funkció a sugárzási nyalábot annak megfelelően képes dinamikusan változtatni, ahol azt a forgalom leginkább indokoltá teszi (a teljesítmény maximalizálásával ezeken a helyeken). A 3600 MHz-es sávban rendelkezésre álló széles spektrumnak köszönhetően ebben a sávban tud megvalósulni a ultramagas adatátviteli sebességek elérhetősége, az extrém kapacitás, mely magas minőségben képes kiszolgálni a jövőben prognosztizálható forgalmi igényeket [60].

A hazai szolgáltatók kurrens spektrumstratégiáját végül a 2022-ben lejáró mobilfrekvenciák kérdésköre határozta meg, mely során a szolgáltatók a 20 év után lejáró 900 MHz-es és 1800 MHz-es sávokért licitálhattak újra. Ennek eredményeképpen az 1800 MHz-es sávban azonos arányban jutottak spektrumhoz (2x20 MHz), a 900 MHz-es sávot illetően pedig legkevesebb 2x8 MHz-re pályáztak sikeresen [61] [62]. Az aukciókat követő hazai spektrumhelyzetet a 9. ábra mutatja be.



9. ábra A hazai spektrumhelyzet 2021 év végén [62]

2.2 A frekvenciatervezés menete, lépései

Az ad-hoc telepítésű bázisállomások szükségessége akkor válik aktuálissá, amikor a vészhelyzetben érintett terület lefedettséggel vagy kapacitással összefüggően problémákba ütközik, azonban a vészhelyzeti kommunikáció számára biztosítani kell a szolgáltatásokat. Olyan területeken, ahol alapvetően nincs rádiós lefedettség, ott a szomszédos cellák nem okoznak számottevő interferenciát az ad-hoc telepítésű bázisállomás cellái számára, ezért a vészhelyzeti bázisállomások frekvenciatervezése nem jelent nehézséget. Ebben a fejezetben olyan frekvenciatervezési vészhelyzeti megfontolásokat fogok számba vetni, amelyek során nagyvárosi környezetben, kiépített mobil hálózati struktúra mellett kell vészhelyzeti állomást létesíteni, továbbá azt is vizsgálom, hogy melyik frekvenciatervezési módszer használata bizonyulhat a legoptimálisabb stratégiának az ideiglenesen indított állomás esetében. A frekvenciatervezés a GSM hálózatok esetén számít komplex és releváns feladatnak, a vizsgálatom is ezt a technológiát érinti. A 3G hálózatokkal a 2022-2023-tól kezdődő magyarországi lekapcsolás fényében nem foglalkozom³. A 4G hálózatok cellái adott frekvenciasávban ugyanazt a szélessávú frekvenciavivőt használják, így az összes bázisállomás minden cellája interferenciát okoz egymásnak ellentétben a GSM technológiával, ahol frekvenciatervezéssel törekedünk a cellák minél nagyobb arányú elkülönítésére a használt vivőfrekvenciák vonatkozásában.

A 4G hálózatok esetén – a 2G hálózatoktól eltérően – az ún. PCI tervezést szükséges végrehajtani az állomások létesítése során, a mobil terminálok a PCI segítségével képesek a cellák megkülönböztetésére. A feladat némileg hasonlítható a GSM hálózatok használt frekvenciatervezéséhez, ellenben a feladat komplexitása jelentősen elmarad a GSM frekvenciatervezési eljárásokhoz képest, ilyen tekintetben tehát

³ Megjegyzendő, hogy egy jelentős piaccal rendelkező amerikai mobil operátor ugyanakkor a 2G hálózat lekapcsolását tette meg hasonló megfontolásból, bár ez nem a 900 MHz-es GSM lekapcsolását jelentette (ezt a sávot korábban sem alkalmazták GSM technológiára), hanem az ennél jóval kisebb lefedettségre képes, az 1900 MHz-es sávban működő minimális spektrumszélességű hálózatot érintette.

a két feladatkör nem mérhető össze egymással. A PCI tervezésnél továbbá nem értelmezhető az azonos és szomszédcsatornás zavartatás sem a GSM-hez hasonló összefüggésben, azaz a site-ok és a cellák közti interferenciát az azok számára allokált PCI-k nem befolyásolják, így ezek tervezésének jelentősége elmarad a GSM hálózaton végzendő frekvenciatervezés fontosságához képest. A PCI tervezéshez elérhető vivők száma is jóval magasabb (504 db), mely a GSM hálózatok csatornakészletéhez képest kb. 10-20-szoros válaszható készletet jelent. A 4G hálózatok PCI tervezését napjainkban már automatizált formában hajtják végre [63].

A GSM csatornák keskenysávú vivőkön (200 KHz) üzemelnek, amelyeket akkurátus frekvenciatervezéssel lehet megtervezni annak érdekében, hogy a bázisállomáson belüli és az azon kívüli szomszédos állomások cellái közt az interferenciát minimalizálják. A cél az, hogy az elérhető frekvenciakészlet a lehető legoptimálisabban kerüljön kiosztásra az adott helyszín adottságai és a cellák egymás közti zavartatásának tekintetében, melyet szimulátorral készített interferencia mátrixok segítségével lehet meghatározni.

A következőkben ismertetem egy nagyvárosi környezetben végzett GSM frekvenciatervezés lépéseit a 900 MHz-es sávban, valamint megvizsgálom, hogy különböző frekvenciatervezési megoldásokkal miként lehetséges egy vészhelyzeti indokból integrált bázisállomást beilleszteni egy meglévő hálózati struktúrába. Célom továbbá az alkalmazható frekvenciatervezési technikák áttekintése, azok analízise és a legmegfelelőbb módszer kiválasztása a vészhelyzeti alkalmazás tekintetében. A lehetséges legkomplexebb tervezési eseteket vizsgálom meg (sűrű, nagyvárosi környezet számos bázisállomással), azonban nem térek ki arra az esetre, ha a vizsgált terület lefedetlen, azaz nincsenek üzemelő bázisállomások, és ez által nincs számottevő interferencia sem. Az analízis segítségével következtetéseket vonok le abban a tekintetben is, hogy milyen előnyökkel járhat a dedikált csatornák használata egy ad-hoc jelleggel indított vészhelyzeti bázisállomás esetén, továbbá, hogy mely frekvenciatervezési megoldások használata bizonyulhat a legoptimálisabbnak az adott szituációra nézve a minőség és az interferencia vonatkozásában. A vizsgálat elvégzéséhez az Aircom hálózattervezési és az ILSA frekvenciatervezési szimulátort vettem igénybe.

2.2.1 Frekvenciatervezés nagyvárosban

A városi teszterületen kiterjedése ~170 km², melynek ellátására 17 GSM site került integrálásra, ezek összesen 52 db cellával rendelkeznek. A tesztben élőhálózati mintákat vettem alapul, így az állomások megtervezése releváns tervezői szempontok alapján került meghatározásra. A teoretikus területet, a bázisállomások elhelyezkedését és szektoraik (celláik) irányszögét a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra Teszthelyszínre kijelölt városi környezet a beillesztett GSM állomásokkal [Forrás: saját szerkesztés]

A bázisállomások közt található 2 szektoros és 4 cellás állomás is, de a 3 szektoros megvalósítás a legjellemzőbb. A szimuláció elsődleges feladata a város lefedéséhez szükséges frekvenciakészlet megalkotása mind a BCCH, mind pedig a TCH réteget illetően annak érdekében, hogy vizsgálat alá kerüljenek a vészhelyzeti állomással kapcsolatos frekvenciatervezési technikák.

Egy esetleges vészhelyzet során a BCCH frekvenciák „tisztasága” (azaz a zavartatás minimalizálása), a híváskezdeményezések és SMS küldések tekintetében [64], a TCH frekvenciák pedig a hívások lebonyolítása vonatkozásában bír kritikus jelentőséggel.

A jelszint és cellahatárok megfelelőségének vizsgálata a **1. Melléklet**ben található.

2.2.2 Interferencia mátrix számítása

Első lépésben a városi bázisállomások BCCH frekvenciáinak tervezésével kezdem a folyamatot, hogy ezt követően egy élőhálózati frekvenciatervhez hasonló terv alapján legyen lehetőségem vizsgálni a vészhelyzeti bázisállomás frekvenciatervezésével kapcsolatos kérdéseket. A tervezési eljárás és a valós vészhelyzeti esemény kapcsán a bázisállomások BCCH és TCH csatornáit kell első körben megtervezni, illetve ezt követően lehetséges beilleszteni a vészhelyzeti állomást. Az analízis logikájának és dinamikájának, valamint a jobb érthetőség érdekében a két layer tervezési fázisait külön fogom elvégezni és vizsgálni. A frekvenciatervezéshez először meghatározom a cellákon alkalmazott frekvenciák közti egymásra hatás, azaz az interferencia mértékét. Azt vizsgálom, hogy a cellák antennái helyükből és irányukból adódóan milyen mértékben zavarják egymást az azonos, valamint a szomszédcsatornás interferencia vonatkozásában. Erről az ún. interferencia mátrix alkot képet, melynek segítségével kimutatható, hogy az azonos (vagy szomszédos) frekvenciát használó cellák mennyire zavarják egymást. Az interferencia mátrix egy bonyolult számítás eredménye, melyet kizárólag szimulátorral, illetve algoritmusok segítségével lehetséges megvalósítani [65].

Az interferencia mátrix olyan kapcsolati értékeket tartalmaz, amelyek az interferencia mértékét mutatják meg bármely olyan cellapár-kombináció esetében, amelyre átfedő predikciók léteznek. Amennyiben az

adott cellapárnak azonos vagy szomszédos csatorna/frekvencia kerül kiosztásra, úgy a dimenziók az alábbiak:

- Azonos csatorna (co-channel) terület:
 - Az „A” cella által kiszolgált terület, amelyet interferencia érintene, ha „A” és „B” cella számára ugyanaz a vivő kerülne kiosztásra;
- Szomszédcsatorna (adjacent channel) terület:
 - Az „A” cella által kiszolgált terület, amelyet interferencia érintene, ha „A” és „B” cella szomszédos csatornát kapna.

Ezek az értékek az interferencia mértéke szerint kerülnek osztályozásra. A területre vonatkozó értékeket (km^2 -ben) az interferencia valószínűségének átlagolásával kapjuk azon a területen, ahol „A” cella a kiszolgáló cella. Az átlagot a megfelelő lefedettségi tömb összes pixelére vetítve kell meghatározni. Az interferencia valószínűségét egy adott pontban (jelen esetben a szimulátor program egy pixelében) a C/I jelkülönbség és szórás alapján statisztikai módszerrel lehet kiszámítani. Az értelmezés alapján a jelszintkülönbség a kiszolgáló és zavaró cella között megegyezik a beállított küszöbérték szintjével, amely 50% valószínűségi értékig jelzi az azonos csatornás zavartatást.

A GSM hálózat szomszédcsatornás zavartatása 18 dB-es értékben határozható meg, így ezt a küszöbértéket állítottam be a szimuláció során, ugyanis ez az az érték, amivel az adott vivő számára a mellette elhelyezkedő két szomszédos csatorna képes interferenciát okozni.

A szimulációt megelőzően meg kell határozni a frekvenciaértékek C/I igényét, amely a BCCH layer esetében 12 dB, a TCH rétegre vonatkozólag pedig 9 dB. Ennek értelmében, amennyiben az azonos csatornás zavartatás C/I küszöbértéke 9dB-re van beállítva, akkor a kiszolgáló és a zavaró cella között 9dB jelkülönbségnek kell érvényesülnie, valamint -9 dB-nek a kiszolgáló és a szomszédos zavaró csatorna között, melyet a C/A paraméter jellemez (a szomszédcsatornás zavartatás valószínűsége szintén 50%-ig emelkedhet).

Az interferencia mátrix kimeneti eredménye egy adatbázis, amely az egyes cellák vonatkozásában meghatározza a zavaró cellák által okozott interferencia értéket az azonos (C/I), illetve a szomszédcsatornás (C/A) zavartatás tekintetében.

Az interferencia mátrix a manuális tájékozódásra is alkalmas, ha szeretnénk megtudni, hogy a teszterület bármely cellája mely szomszédos vagy távolabbi cellával és milyen mértékben van zavarva azonos és szomszédcsatornás vonatkozásban. Ugyanakkor manuális tervezéssel a komplex számítások elvégzése nem adekvát, mivel a tervezési halmaz széles spektrumot ölel át, így a lebonyolításhoz minden esetben algoritmusok igénybevétele szükséges. A TCH esetében a hopping nyereség maximalizálása érdekében TRX+1 frekvencia leosztásával számoltam annak érdekében, hogy a fractional load és a hopping nyereség optimálisabb legyen.

2.2.3 Szimulátoros frekvenciatervezés megvalósítása

A frekvenciatervező szoftver által alkalmazott algoritmus hatékonysága az ún. cost mátrixal határozható meg. A cost mátrix felparaméterezése során a frekvenciatervezés előírásaira vonatkozó minden szabályt szükséges megadni annak érdekében, hogy a tervezőszoftver a tervezési alapelvek és kívánalmak szerint járjon el. Ennek során bekonfigurálásra kerül, hogy az algoritmus milyen frekvenciakészletből tervezhet csatornákat, milyen azonos és szomszédcsatornás kritériumokat szükséges teljesítenie, mekkora védőtávolságot kell tartania cellák és site-ok között stb. Minden szabály és kategória egy költséggel jellemezhető, minél fontosabb az adott szabály, annál magasabb költségértékre kell állítani, a szabályok alkalmazására pedig büntetési értékeket megadni, hogy az algoritmus a döntési fa minden egyes pontjában képes legyen a következő lépést a tervezettnek megfelelően kiszámítani. A pontos beállításokat annak komplexitása miatt nem vázolólok, de a fent ismertetett és a következőkben vázolt princípiumok szerint jártam el.

Egy adott frekvenciaterv esetében a költségfüggvény értékét a következő képlet adja meg:

$$Cost = \sum_i \left\{ w_i \left\{ \sum_{j|(F_i=F_j)|} C_{ij} + \sum_{j|(F_i=F_j\pm 1)|} A_{ij} + \sum_j S_{ij} \right\} + R_i + D_i + H_i \right\}, \quad (1)$$

- $A_{ij} = A_{„j”}$ allokáció által az „i” allokáción okozott szomszédos csatornás zavartatásból adódó interferencia (egység: $200 \cdot mE$ vagy $20\,000 \cdot km^2$);
- C_{ij} : $A_{„j”}$ allokáció által az „i” allokáción okozott azonos csatornás zavartatásból adódó interferencia (egység: $200 \cdot mE$ vagy $20\,000 \cdot km^2$);
- F_i : Az „i” allokáció számára kiosztott frekvencia;
- i, j : Frekvenciakiosztási halmazok;
- R_i : Az „i” allokációhoz kapcsolódó újrhangolási költségértéke;
- D_i : Az „i” allokációhoz tartozó fixált vagy tiltott vivő költségértéke;
- S_{ij} : Az elválasztásból adódó költségértékek (szomszédcsatorna leosztás, kivételkezelés vagy beállított szeparációk miatt) „i” és „j” allokáció között;
- H_i : Az „i” kiosztáshoz kapcsolódó handover és intermodulációs interferencia költségértékei;
- W_i : Az „i” allokációra vonatkozó súlyozási tényező [66].

Az alkalmazott szoftver tehát a fentebb vázolt költségmátrixot veszi alapul egy heurisztikus intelligens keresési algoritmust használatával. A meghatározott költségmátrix és szabályok mentén az algoritmus kombinatorikus matematikai egyenletekkel értékeli az adott frekvenciaterv "büntetési költségét", és a költség minimalizálása érdekében definiálja és módosítja a frekvenciakijelöléseket a korlátozások halmazát változtatva. A magasabb kapcsolódó költségekkel rendelkező korlátozások megszegésének valószínűsége kisebb, ezért az erre vonatkozó előírások beállítás fontosságának arányosnak kell lennie a büntetési költségükkel a prekonfigurálás során. A költségmátrix elsődleges (de nem az egyetlen) beállított megkötései a frekvenciák közötti minimális elkülönítésre vonatkoznak a lenti csoportokat vonatkozásában:

- Ugyanazon a cellán belül (intra-cell);
- Ugyanazon site, de másik cella (intra-site);
- A cella és azok szomszédjai.

Amikor az iterációk (egyes számítási keretek) üteme csökken, radikálisabb lépésekkel próbálkozik az algoritmus az előrelépés érdekében, melyet követően folyamatosan optimalizálja és keresi a jobb megoldások lehetőségeit minden iteráció előrehaladtával, majd a számítások gyarapodásával egyre jobb tervvel és leosztással áll elő. A folyamat kimeneti eredménye végül egy élőhálózatban jól használható frekvenciaterv [66].

A tervezés során a valóságot és a szolgáltatók szélessávú hálózatokkal szembeni kapacitáskényszeret vettem alapul, mely során a 3G hálózatok lekapcsolásra kerülnek és azok frekvenciái LTE és 5G cellák indítására allokálódnak. A GSM hálózatok várhatóan az évtized végéig működni fognak Magyarországon az LTE hálózatok alatt, mint áramkörkapcsolt hangszolgáltatásokat biztosító layer, ellenben az operátorok a GSM frekvenciatartományt a növekvő adatforgalmazási igények miatt csökkenteni kényszerülnek, így a korábbi 8-10 MHz-es spektrumkészlet helyett kb. 5 MHz áll majd rendelkezésre a technológia üzemeltetésére, a felszabadult spektrumon pedig LTE technológia fog indulni. Vizsgálom tehát azt is, hogy nagyvárosi környezetben lehetséges-e 5 MHz-es frekvenciaspektrum mellett jó minőségű sávszűkített frekvenciaterv készítése. A hálózatmodernizációs projektek megtörténtével tehát (következő évek) – az új LTE kapacitás és 5G cellák indítását követően – a GSM hálózatok üzemeltetésére kb. ilyen szélességű spektrum áll majd rendelkezésre. Ma Magyarországon 35 MHz spektrum áll a szolgáltatók rendelkezésére a 900 MHz-es sávban (downlink és uplink irányban is), melynek jelenlegi eloszlása nem egyenlő a spektrumot bérlő operátorok között (az utolsó frekvenciaaukción végkimenetele miatt). Ugyanakkor a szolgáltatók számára minimálisan rendelkezésre álló frekvenciaspektrumot figyelembe véve (10 MHz FDD / operátor a 900 MHz-es sávban) az LTE 900 5 MHz sáv szélességben történő országos kiépítésének ambíciója is adekvát lehet a GSM 900 5 MHz-re való sávszűkítését követően. Az ún. dinamikus spektrum megosztó mechanizmusok és feature-ök segítségével a spektrális hatékonyság tovább javítható lesz. Ezen funkciók segítségével a GSM vagy az LTE számára allokált spektrum eloszlásának aránya dinamikusan változtatható annak tükrében, hogy a forgalom éppen mely hálózatokat terheli adott időpillanatban (pl. a GSM cella 8 MHz-en üzemel, amennyiben az LTE forgalom nem számottevő, de már csak 5 MHz-en működik, amennyiben az az LTE cellán megnő a forgalom).

Arra az esetre méreteztem, ahol a GSM sáv 5 MHz, ennél szűkebb spektrumon értelmezhető kapacitás – elfogadható hálózatminőség elérése mellett nem értelmezhető. A GSM technológia csatornáinak/vivőinek szélessége 200 KHz, így ez 25 darab vivő használatára elegendő, mely csekély kapacitásra ad csak lehetőséget. Ennek tükrében a vészhelyzeti bázisállomás BCCH-ra és TCH -ra használható vivőit 15/25 (BCCH/TCH) osztottam el frekvenciatervezési tapasztalatok alapján. A BCCH layer az idő 100%-ban kisugárzása kerül maximális teljesítménnyel (4 TRX esetén a 40 W-ból 10 W-al), így a lehető „legtisztább” C/I-vel rendelkező, interferenciától minél mentesebb csatornákra van szükség. Ugyanakkor

a TCH csatornák száma még a hopping használata esetén is frekvenciaigényes (TRX számosság miatt), így ez az arány tűnik a legoptimálisabb választásnak. BSIC tervezésével nem foglalkozom. Összegezve tehát a fentieket a BCCH csatornák számára 2 MHz-et, a TCH számára pedig 3 MHz-et allokáltam a frekvenciatervezés során [67].

2.2.4 A BCCH réteg vészhelyzeti frekvenciatervezése

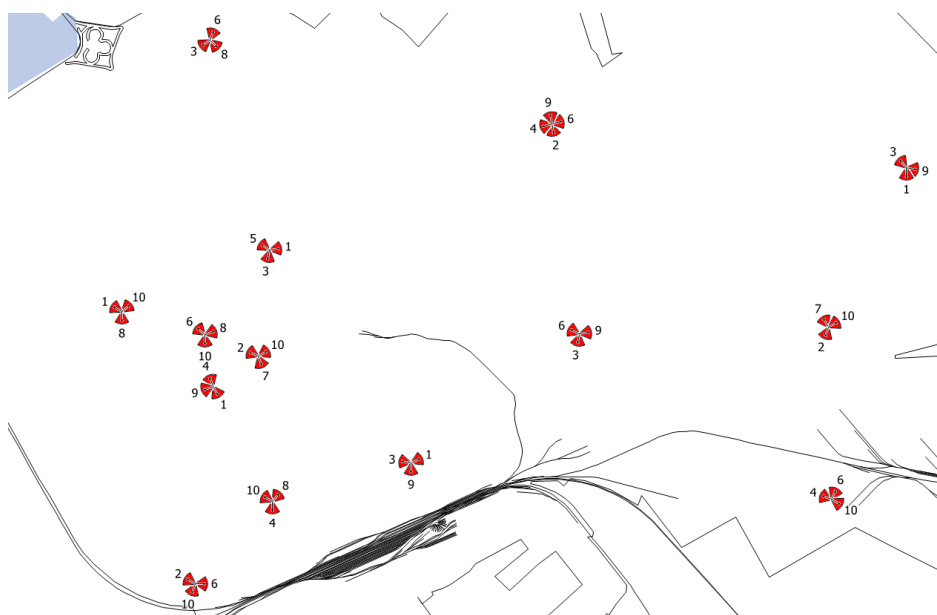
Annak érdekében, hogy a vészhelyzeti bázisállomás frekvencia-beilleszthetőségét vizsgáljam, első körben a város 5 MHz-es frekvenciatervét szükséges elkészíteni, mely első körben a BCCH-t érinti. A BCCH layer tervezésekor a 12 dB-es C/I és 18 dB-es C/A kritériumok teljesítését írtam elő. A BCCH layer a TRX teljesítményre leosztott teljes teljesítménnyel kisugárzásra kerül, power control nincs, ennek fényében a tervezett csatornák az idő 100%-ban interferenciát okoznak az azonos vagy szomszédcsatornát használó cellák számára. Az alapelvek szerint a BCCH-t illetően azonos és szomszédcsatornás zavartatás site-on belül nem megengedett, valamint az interferencia mátrixban szereplő kapcsolatok alapján az elérhető frekvenciakészlet csatornáit a lehető legjobban el kell különíteni egymástól (reuse maximalizálás), minimalizálva ezzel az interferenciát.

Az 5 MHz-es spektrumszélesség 25 db vivőjéből (200 KHz-es vivőszélesség) 10 db-ot allokáltam a BCCH layer-re révén, hogy a TCH-k esetén cellánként (NTRX+1 fractional load-al számolva) 3 vivőt szükséges majd tervezni, ami bázisállomásonként (3 szektoros állomás esetén) 9 db frekvenciát jelent, míg a BCCH-ra 3 db csatornát szükséges kijelölni. Az egyszerűség kedvéért a használt csatornákat 1-25-ig számoztam fel:

- BCCH réteg: 1-10;
- TCH réteg: 11-25⁴.

Az algoritmus a frekvenciatervezési beállítások és a költségek meghatározását követően 12.062.988 db számítási ciklust futtatott le az algoritmus. Az interferencia mátrix, a felparaméterezett költségmátrix és egyéb szabályok megadását követően a feladatot egy átlagos tulajdonságokkal rendelkező PC kb. 3 napi számítással volt képes elvégezni. A BCCH frekvenciaterv (a kiosztott) vivőcsatornákat a 11. ábra szemlélteti.

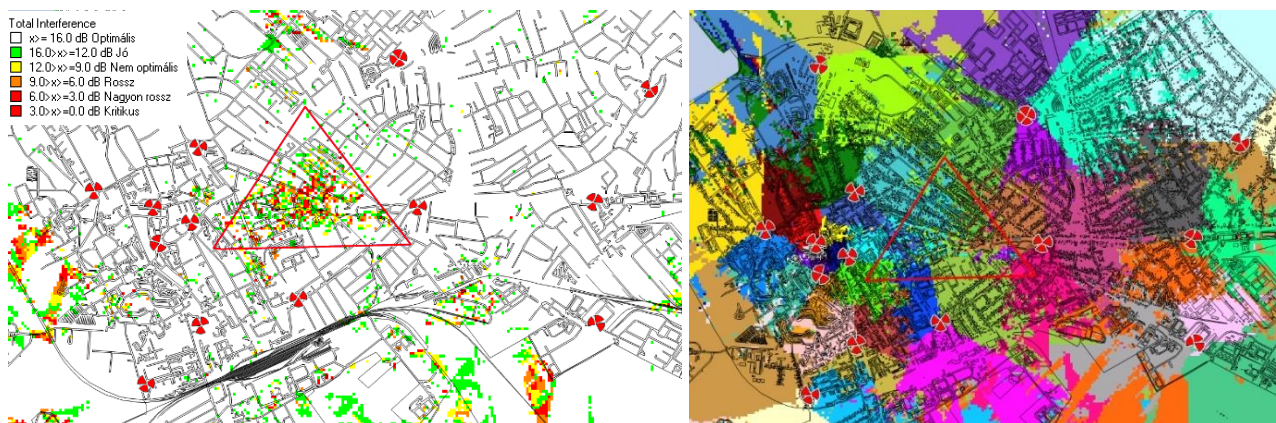
⁴ Az általam végzett szimulációk tehát elméletben 925,1 MHz-től 930,1 MHz-ig tart downlink és 880,1 MHz-től 885,1 MHz-ig az uplink tartomány függetlenül attól, hogy ez a sáv jelenleg foglalt Magyarországon [67]. A frekvenciaterv leosztása downlink és uplink irányban megegyezik (ugyanazt a csatornát osztja a rendszer mindkét frekvenciasávban – FDD), így az FDD up és downlink irányát nem szükséges elkülönítve tervezni.



11. ábra BCCH frekvencia terv [Forrás: saját szerkesztés]

A frekvenciatervet elfogadhatónak ítélt meg, a fent részletezett szabályokat követte az algoritmus, ellenben az interferencia szimuláció vizuális és statisztikai ellenőrzése is szükséges az eredmény kiértékelése során. Ez kiindulási alap lesz a vészhelyzeti esemény szimulációja kapcsán, amely során a szimuláció helyszínéül választott városban egy kapacitáserősítési indokból indított ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomás kerül majd beintegrálásra, hogy az alkalmazható frekvenciatervezési módszerek vizsgálat alá kerülhessenek.

A végeredmény ellenőrzéséhez poligonokkal is kiegészítettem a vizuális interferencia predikciót (utcák, főutak, vasutak rajzolata), melyen a **zöld** pixelek jelölik azokat a pontokat, ahol a BCCH réteghez szükséges C/I teljesül (12 dB). Az interferencia predikción mind az azonos, mind pedig a szomszédcsatornás zavartatás kalkulálódik az „I” tekintetében, a „C” pedig a kiszolgáló cella jelszintjéből tevődik össze. Az optimális interferenciát magasabbra állítottam, mint a minimális BCCH C/I igény, ezt 16 dB-ben választottam meg. Az interferencia predikción a **zölddel** (C/I 16 dB – 12 dB) és **fehérrrel** (C/I > 16 dB) jelölt pixelek, amelyek az elfogadható és a kiváló kategóriába sorolhatóak [68], az eredményt a 12. ábra mutatja be.



12. ábra Interferencia predikció az új BCCH layer-re (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

13. ábra A cellahatárok elhelyezkedésének szimulációja, mellyel együtt a C/I szempontból problémás területre odalátó kiszolgáló cellák láthatóak (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

A predikción az látszik, hogy a frekvenciaterv optimális, mert a cellák kiszolgálási területén nagyjából teljesül a 12 dB-es C/I igényen felüli 16 dB-es (szigorúbb, általam felülméretezett) feltétel is. A **piros** háromszöggel jelölt városi terület kivételével az interferencia optimális az algoritmussal készített tervvel, ezért a lentiekben a háromszöggel jelölt részt fogom tovább analizálni az interferencia szemszögéből. Az interferencia a kiszolgáló cellát zavaró cellák zajából tevődik össze, melynek tükrében a **piros** háromszöggel jelölt – interferencia szempontjából – problémás terület zavaró celláira a cellahatáros predikcióból következtethetünk (13. ábra), tehát, hogy mely cellák látnak oda és azok hol kiszolgálóak.

A problémás területre (**piros** háromszöggel határolt terület) vonatkozólag statisztikát készítettem a mérhető C/I átlagokról, mely a **2. Melléklet**ben található.

A kívánatos vagy elfogadható C/I szintek (optimális és jó) a terület 80%-án teljesült, a maradék 20%-án viszont a szolgáltatás minőség rossz vagy kritikus szint alá csökken. A jelölt problémás területen lévő felhalmozódott interferencia oka a celladominancia hiánya, ez által a többi távoli cella által okozott interferencia jobban érvényesülhet. A jelölt terület több cella határán helyezkedik el, melyek kis jelszinttel „látnak” oda, így az alacsony jel/zaj viszony miatt az interferencia megnövekedett, a C/I-n ennek tükrében frekvenciatervezéssel nem lehetséges tovább javítani. A valóságban ilyen területen a hanghívások minősége leromlik, degradálódik a bit/hiba arány és az egyes minőségi KPI-k (pl. RXQUAL) [69]. A valóságban egy esetleges vészhelyzet során a GSM hálózaton való kommunikáció a terület egy részén ellehetetlenülne, a hívásminőség romlásán kívül híváseldobások is tapasztalhatóak volnának. Ezen felül, amennyiben a GPRS és EDGE csomagkapcsolt csatornák a BCCH időréseiben kerülnek bekonfigurálásra, úgy az adatkapcsolat sem működhetne megfelelően a bit/hiba arány romlása miatt. A PDCH BCCH-ra való statikus felprogramozásának hátránya a BCCH csatorna esetleges nem kívánatos leterhelése, azonban a dinamikus adatesatornák és dinamikus spektrummegosztó funkciók alkalmazásával a helyzet javítható (forgalomfüggő dinamikus allokáció a hangforgalom prioritásával az adatszolgáltatásokkal szemben)[70].

Egy vészhelyzeti esemény során a felhasználó szokások drasztikusan megváltoznak, mely olyan forgalomnövekedést generál, amit az adott cellák nem biztos, hogy képesek kezelni. Amennyiben a vészhelyzetben tartósan torlódás áll fenn (pl. egy robbantásos esemény kapcsán) vagy az adott terület lefedettségi hiánnyal vagy minőségi problémákkal küzd, úgy ilyen esetben (a 1.4.2 fejezetpontban ismertetett) ad-hoc telepítésű ideiglenes bázisállomások indítására van szükség. A következőkben az ilyen állomások beilleszthetőségét fogom vizsgálni frekvenciatervezési szempontból.

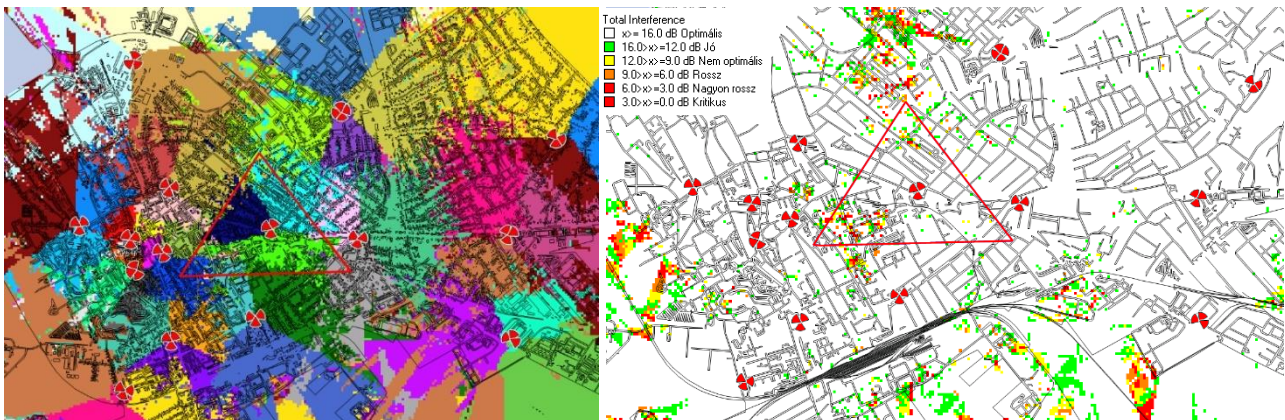
Az interferencia és minőség problémás (fenti szimulációkon **piros** háromszöggel jelölt) terület jó helyszíneként szolgálhat a beillesztendő vészhelyzeti állomás elhelyezésére, és a vészhelyzeti terület kijelölésére, mert itt a legnagyobb az interferencia, amit javítani szükséges. A továbbiakban azt

vizsgálom, hogy ha az interferencia szempontjából a legkritikusabb területen alakul ki krízishelyzet, úgy milyen módon valósítható meg a vészhelyzeti állomás frekvenciatervezése.

A frekvenciatervezést a fent ismertetett módszerrel végeztem el az újonnan integrált vészhelyzeti bázisállomásra is, a BCCH layer-re vonatkozó eredményt a 14. ábra, 15. ábra, 16. ábra szemlélteti.



14. ábra A vészhelyzeti állomás BCCH frekvenciaterve [Forrás: saját szerkesztés]



15. ábra Cellahatáros predikció a vészhelyzeti bázisállomás beillesztését követően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

16. ábra A C/I szimuláció a BCCH-ra vonatkozólag szintén a vészhelyzeti állomások bekapcsolása után (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

A szimulált vészhelyzeti állomásnak köszönhetően a cellahatárok megfelelő ellátásról tanúskodnak, mely optimális celladominancia mellett, a többi korábban odalátó cella kiszorításával javítani látszik a terület ellátását. Az új állomás BCCH frekvenciáinak megtervezését követően az a vészhelyzeti bázisállomás elindításával a minőségi szempontból kritikus területeken megfelelő dominancia és C/I viszonyok alakultak ki, a mért statisztikák a **3. Melléklet**ben találhatóak.

A beillesztett állomás és annak optimális frekvenciatervezésével a terület kb. 95%-án mértem megfelelő C/I értéket, mellyel biztosított a BCCH layer működése a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából.

Ezzel a hálózat elérhetőségének, a hívások kezdeményezésének, az SMS küldés indításának sikerességi arányát pozitív irányban sikerült befolyásolni.

A dedikált csatornákkal való BCCH tervezés aspektusait, a mérés statisztikáit és leírását a **4. Melléklet** tartalmazza. Dedikált csatornák használatával a teszterület 98%-án magas minőségű és tisztaságú BCCH layer volt előállítható, mivel az integrált vészhelyzeti site kiszolgálási területén a C/I tökéletesen alakult. A valóságban Magyarországon a 900 MHz-es spektrumhelyzet nem engedi meg, hogy a szolgáltatók vészhelyzeti alkalmazásra dedikáljanak GSM csatornákat. A vészhelyzetre dedikált csatornák spektrumtöbblet nélküli lehetőségeit a következő fejezet végén tárgyalom⁵.

2.2.5 A TCH réteg vészhelyzeti frekvenciatervezése

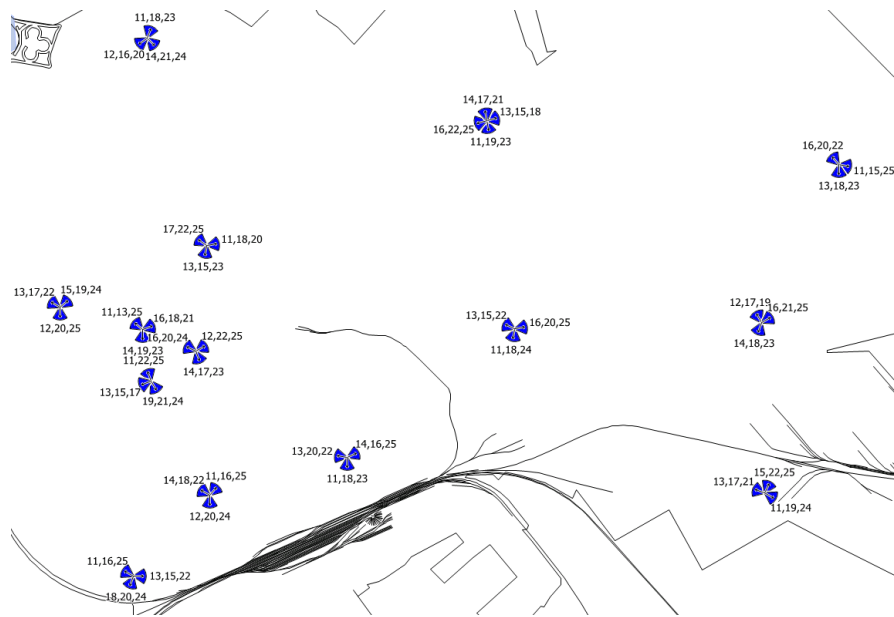
A város TCH rétegének megalkotásához, valamint ezt követően a vészhelyzeti állomás forgalmi csatornáinak megtervezéséhez is szükséges volt a frekvenciatervező algoritmust megfelelő szabályok mentén való felprogramozása.

A városi tervhez synthesier hopping-ot fogok alkalmazni első körben és a rendelkezésre álló 5 MHz-ből 3 MHz-et, azaz 25 csatornából 15-öt fogok a forgalmi csatornák tervezésére szánni. Nagyvárosi környezet révén 3TRX-es cellákkal terveztem, melyek közül 1 TRX a BCCH, 2 TRX pedig a TCH layer (ez egy átlagos cella kapacitásával egyezik meg). Mivel a fractional load-ot TCH TRX + 1 vivőre terveztem annak érdekében, hogy javítsam a hopping nyereséget (a TRX számosságához képest plusz frekvencia van a hopping szekvenciában), így célul tűztem ki, hogy a 2 TCH TRX-re 3 frekvenciavivőt tervezek. Amennyiben az adott cellán a forgalom alacsony, úgy a „valóságban” maximum 1 TCH TRX üzemel, mely esetben synthesier hopping alkalmazásával 3 db frekvencia kerül „ugráltatásra” adott időkeretenként, elkenve ezzel az interferenciát, illetve javítva a minőséget. Amennyiben a cella forgalma magasabb (pl. busy hours-ben, azaz a legforgalmasabb órákban), úgy mindkét 2 TCH TRX-nek üzemelni kell ahhoz, hogy a load kezelhető legyen. Mindemellett ezzel a konfigurációval még mindig lesz plusz 1 vivőfrekvencia, ami a hopping szekvenciában nyereséget jelent az interferencia szempontjából. A TCH layer tervezése a vivő számossága miatt bonyolultabb tervezést igényel, az interferencia is meg fog növekedni ez által. A tervezési alapelvek eltérőek a BCCH-nál alkalmazottakkal, ennek részleteit csak érintőlegesen említeném. Cellánként a 2 TCH TRX-re tehát plusz 1 vivőfrekvenciát fogok tervezni⁶, cellán belül nem oszthat szomszédos csatornát az algoritmus, site-on belüli vagy egymással szembe néző cellák esetén optimális esetben 1, rosszabb esetben maximum 2 db szomszéd csatorna lehet kijelölve [71]. Első lépésben a TCH frekvenciákkal foglalkozom, ezt követően illesztem be a vészhelyzeti állomást újabb tervezéssel (követve azt a sorrendet, ami valóságban is történne egy vészhelyzeti állomás helyszínre vezénylése során). A város frekvenciatervének elkészítése meg kell, hogy előzze a vészhelyzeti állomás tervezését, amennyiben valós, az élőhálózatához hasonló környezetben szeretném a szimulációt elvégezni. A következő lépésben a korábban lefuttatott interferenciamátrix segítségével minden cellára 3 db TCH

⁵ Ennek relevanciáját és vizsgálatát további kutatási célnak jelölöm meg

⁶ [Fractional load] = [TRX-ek száma] / [vivőcsatornák száma] ; [FL] = [2/3] = ~66,7%

vivő került megtervezésre (a rendelkezésre álló 15 db TCH csatornából). A költségmátrix és a szabályok megadását követően 22.062.988 db iteráció lefuttatása után a 17. ábra szerinti eredményre jutottam.

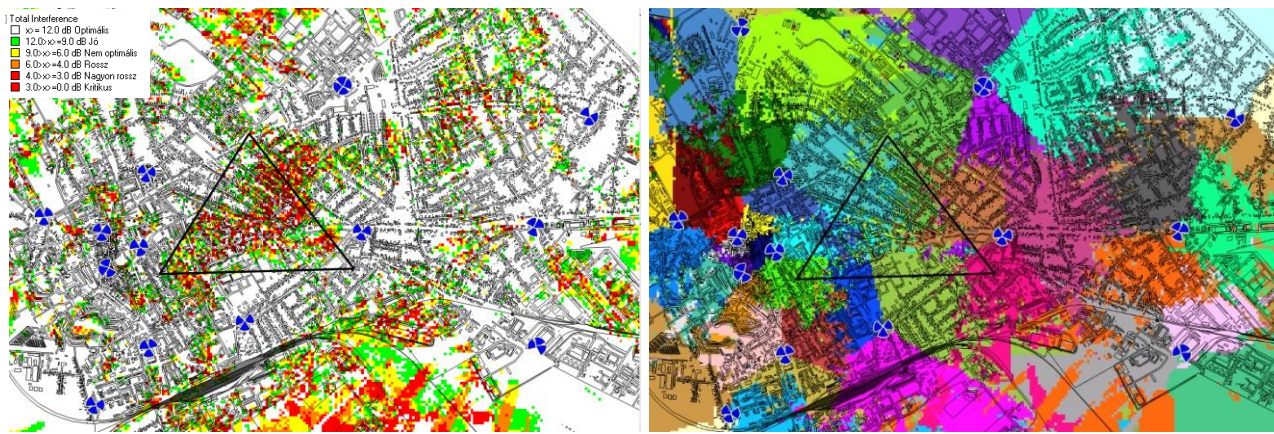


17. ábra A TCH frekvenciaterv a vészhelyzeti eset szimulációját megelőzően [Forrás: saját szerkesztés]

A frekvenciatervet elfogadhatónak ítélt meg, a TCH frekvenciaterv ellenőrzésére az interferencia szimulációk, a vizuális ellenőrzés, valamint a statisztikai mérések eredményei szolgálnak. A frekvenciaterv tovább optimalizálható, amennyiben az algoritmus minél több iterációt/számítást futtat (ez akár több hetet is igénybe vehet), ellenben általánosságban elmondható, hogy mindig akad olyan hiba, amit manuális frekvenciatervezői vizsgálattal javítani szükséges, melyet az ellenőrzést követően elvégeztem.

Néhány gyengébb C/I eredményt mutató frekvenciát szándékosan hagytam a tervben, hiszen az előhálózati frekvenciakiosztásban is előfordulnak ilyen csatornák. A kiosztott TCH vivők vizuális (egyesével való) ellenőrzését a vészhelyzeti bázisállomás beillesztését követően ellenőriztem, melynek eredményét az alábbiakban értékelem ki.

A következő predikción láthatóak a tervezett frekvenciákkal elért C/I eredmények. A TCH frekvenciák C/I igénye a BCCH frekvenciákhoz használt 12 dB-hez képest csak 9 dB, ezért a predikción látható interferenciaértékeket is ennek megfelelően állítottam be (a 9 dB-es C/I szintnek a hopping nyereséggel együtt kell teljesülnie). A zavartatást mindig a kiszolgáló cella szenved el. A bal oldali ábrán (18. ábra) a TCH C/I interferencia predikció látható, a jobb oldali ábra (19. ábra) pedig a cellahatáros szimulációt mutatja be, melyről leolvasható, hogy az adott interferencia mely cellát érinti.



18. ábra A város C/I interferencia predikciója (a vészhelyzeti állomás beilleszthetőségének előtevékenysége), fekete háromszöggel jelölve az interferencia szempontjából problémás (a BCCH tervezésekor meghatározott) terület (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

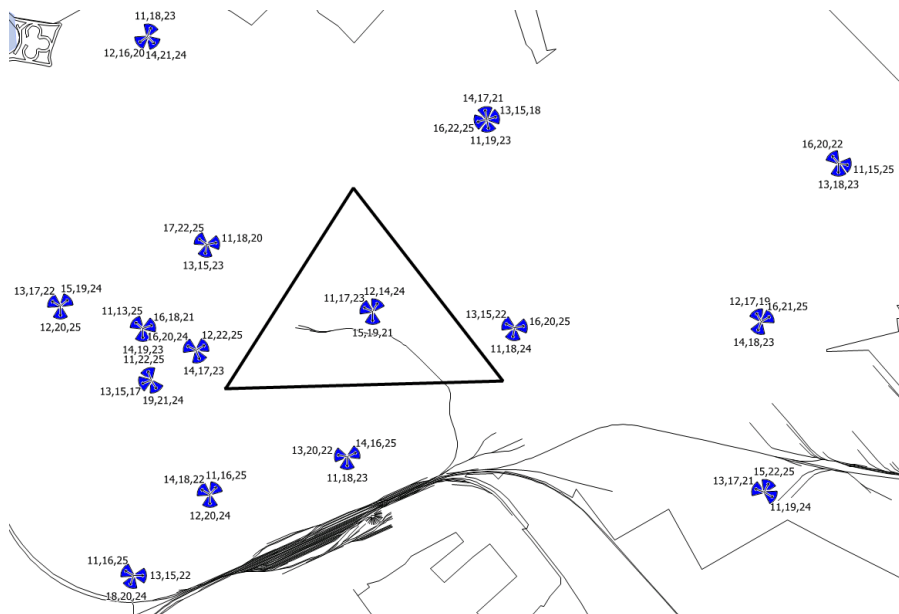
19. ábra A cellahatáros predikció (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

Említettem, hogy a TCH forgalmi csatornák tervezése bonyolultabb, mivel több vivőre van szükség per cella, jelen szimuláció során 3 vivőre terveztem (3 TRX-es cellák, 1 BCCH és 2 TCH TRX, melyből a 2 TCH-ra allokált 3 vivőt alkottam meg jelen fázisban). Megállapítható, hogy cellák a kiszolgálási területén (domináns jelszint és C/I) a cellahatárok közeledtég mindenhol elfogadható a TCH C/I eredménye, tehát a frekvencia terv optimálisnak tekinthető. A cellahatárokhoz közeledve a kiszolgáló cellák jelszintjei egyre csökkennek (a C/I is romlik), mivel a jelszint és dominancia csökkenésével egyre több interferáló cella képes megzavarni azokat. A legkritikusabb rész a TCH réteg esetén is ugyanarra a területre esik, amelyet a BCCH tervezésekor már meghatároztam (**fekete** háromszög), mely területre (továbbiakban teszterület) statisztikai méréseket is végeztem a C/I szempontjából (**5. Melléklet**).

A mért statisztikák értelmében a terület kb. 46%-ban van lehetőség jó minőségben vészhelyzeti hívásokat indítani, 15%-án viszont kritikus értékeket kaptam. A TCH forgalmi csatornák a teszterületen mérhető C/I statisztikái is rámutatnak arra, hogy egy esetleges vészhelyzeti esemény során az interferencia szempontjából ezen a területen tapasztalnánk a legnagyobb problémát a szimulált városi környezetben, megerősítve ezzel azon fenti feltételezésem, miszerint ez a terület a legmegfelelőbb helyszín a vizsgálatok lefolytatására, valamint az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti ideiglenes bázisállomás indítására.

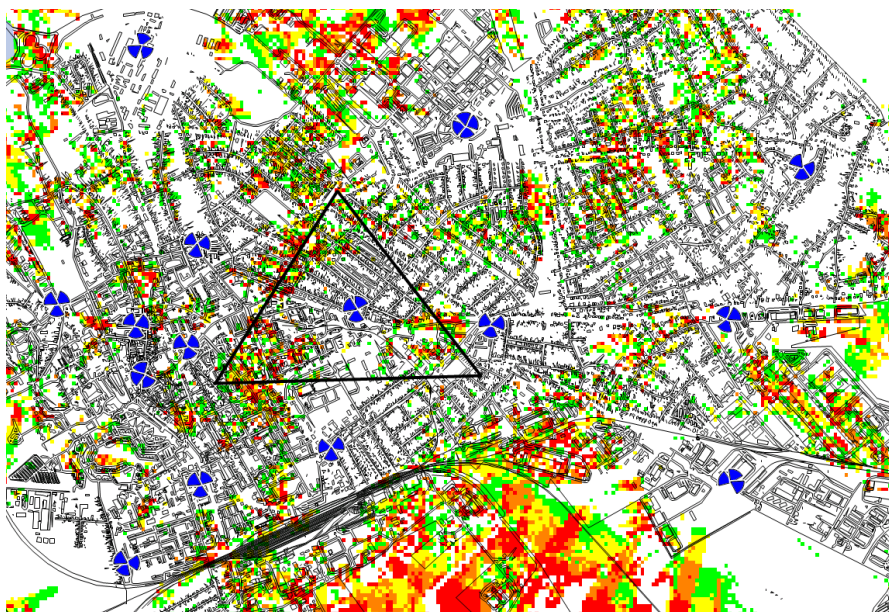
A C/I értékeken frekvenciatervezéssel már nem lehetséges tovább javítani, az ideiglenes vészhelyzeti állomás beillesztését megelőzően a teszterületről megállapítható, hogy a BCCH layer-en a hívások kezdeményezése vélhetően sikeresen lezajlanának, de a beszédhívás minőségének tekintetében rossz vagy szakadozó hangminőség volna prognosztizálható annak ellenére, hogy a területre jutó jelszint egyébként optimális (**1. Melléklet**).

A cellák TCH frekvenciáinak megtervezését követően az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti állomás TCH rétegének megtervezése következik. Révén, hogy egy meglévő tervbe szeretném beilleszteni a vészhelyzeti állomást, így zaj szempontjából kevésbé jó minőségű csatornák is bekerülnek majd a hopping szekvenciába. A TCH tervet a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra A vészhelyzeti bázisállomás TCH frekvenciaterve [Forrás: saját szerkesztés]

Az interferencia szimuláció alapján a tervezett frekvenciák megfelelőek a bázisállomás kiszolgálási területén, sikerült még a rendelkezésre álló lehetőségekkel is jó minőségű C/I értékeket biztosítani, amelyet a következő predikció igazol (21. ábra).



21. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással (a frekvenciatervezéssel meghatározott forgalmi csatornákkal) - [Forrás: saját szerkesztés]

Az interferencia predikció fenti vizuális és statisztikai méréseinek ellenőrzését követően az alkalmazott csatornákat szükséges egyesével vizuálisan is ellenőrizni (3 MHz spektrumszélesség, 11 - 25-ös csatorna). Az adott cellára kiosztott csatornák megfelelőségét megvizsgáltam, és azokat rendben találtam. Az említett manuális módszerrel ellenőrizhető, hogy azonos csatornák mekkora izolációval és milyen irányban kerültek leosztásra a cellákra. A 11-es vivőtől a 25-ös vivőig tartó csatornakiosztást – az adott cella kiszolgálási területének megjelenítése mellett – a **6. Melléklet**ben csatoltam.

Az eredményekre alapján megállapítható, hogy az ideiglenes állomással és fenti csatornák használatával jó minőségben lehet kiszolgálni a vészhelyzeti területet, a beszédcsatornák megfelelő hangminőséggel, akadozás és megszakadás nélkül üzemelnének, valamint + 9 TRX (szektoronként 3 TRX) kapacitás állna rendelkezésre a megnövekedett felhasználói igények kielégítése, mindezt a szükségesnél egyel több frekvencia ugráltatásával a hopping szekvenciában (mindhárom cellára vonatkozólag), még jobbá téve ezzel a szolgáltatás minőséget.

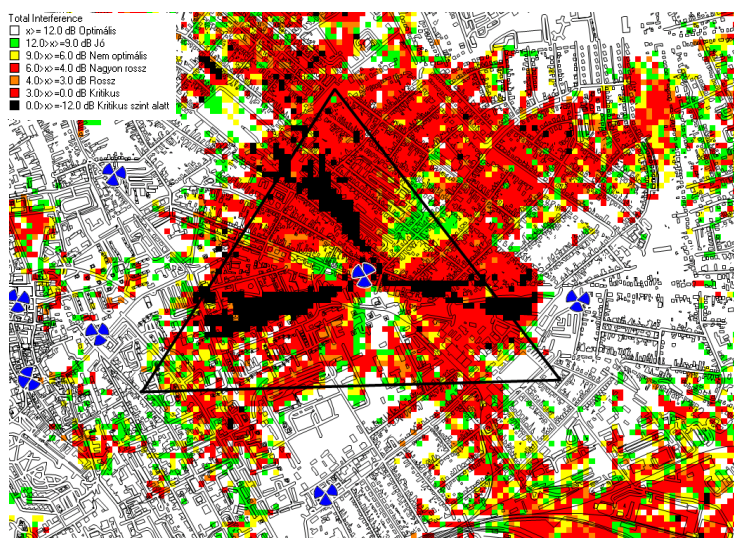
A C/I mérések alapján a vészhelyzeti (vagy teszt)terület több, mint 80%-án lehetséges jó minőségben hanghívást indítani, a kritikus szintet pedig kb. 4% környékére sikerült lecsökkenteni az állomás integrálásával, melyet a statisztikai mérések is verifikálnak (**7. Melléklet**).

A bázisállomás forgalmi csatornáinak megtervezésével megfelelő minőséggel és kapacitással látható el a bázisállomás szolgáltatási területe, ellenben a szimulátoros frekvenciatervezés időigényes folyamat. A vészhelyzeti bázisállomás gyors integrációja esetenként gyors beavatkozást igényel, amely a TCH layer további frekvenciatervezési alternatíváinak analizálását vonja maga után.

2.2.6 1/1 módszer vészhelyzeti alkalmazása

A következő vizsgálandó frekvenciatervezési módszer a TCH csatornák megtervezésére vonatkozólag az ún. 1/1 módszer használata. A metódus alkalmazásával kizárólag a BCCH (és BSIC) csatornák megtervezésére van szükség, ellenben a TCH réteg tekintetében nem szükséges a fentiekben bemutatott komplex módszerrel frekvenciát tervezni, ugyanis a bázisállomás cellái a spektrum összes használható csatornáját igénybe veszik (minden cella ugyanazokat a frekvenciákat). Ezt a módszert általában azokon a vidéki területeken alkalmazzák, ahol a GSM sáv 5 MHz vagy annál szűkebb spektrumra korlátozódik pl. valamelyik szélessávú technológia (3G, 4G vagy 5G 900 MHz-es) indítása miatt. A vidéki területeken kisebb a forgalom és a kapacitásigény, mint a városokban, valamint egyszerűbb a frekvenciák ütközését kiküszöbölni. A fentiekben bemutattam, hogy 3 TRX-es cellák mellett egy nagyvárosi cellás környezet frekvenciatervezése jó minőségben megvalósítható az 5 MHz-re szűkített spektrumon, azonban más a helyzet, ha a frekvenciatervezésre a vészhelyzet súlyosságából adódóan nem áll rendelkezésre elegendő idő (vészhelyzeti állomás sürgős indítása). Ilyen esetben az 1/1-es módszer használata indokolt, mert minden cellára az összes elérhető TCH leosztásra kerül (11-től 25-ig), és így 15 db vivőfrekvenciát lehet alkalmazni a hopping szekvenciában. Ennek tükrében viszont – a 4G és 5G hálózatokhoz hasonlóan – minden cella interferál egymással site-on belül, illetve azon kívül is, ugyanakkor a hopping nyereség miatt, valamint a vivőfrekvenciák izolációjával révén ennek a technikának meglátásom szerint van jogosultsága a vészhelyzeti állomások alkalmazásában is. Példámban a teljes város frekvenciatervét nem változtatom 1/1-re (ennek a valóságban sem volna értelme), hiszen a teljes városi frekvenciaváltás a folyamatok megtervezésével időigényes és összetett feladat, a cél pedig éppen az ellenkező volna, azaz a frekvenciatervezés elhagyásával időt nyerni. A teljes város TCH rétegének 1/1-re váltása meglátásom szerint kontraproduktív folyamat lenne, hiszen a bázisállomások számára megfelelően izolált és jó minőségű csatornák kerültek leosztásra a tervezés során.

A vészhelyzeti állomás celláira tehát felkonfiguráltam minden elérhető TCH vivőt az 1/1-es módszernek megfelelően és újrafuttattam az interferencia predikciókat, melyek eredményét a 22. ábra mutatja be.



22. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással, frekvenciatervezés nélkül 1/1 metódus használatával [Forrás: saját szerkesztés]

Mivel ebben a megoldásban az összes frekvenciavivő alkalmazásra kerül a vészhelyzeti site mindhárom szektorán, így az állomás közvetlen közelében megnövekedett az interferencia. A vészhelyzeti bázisállomás celláinak bázisállomáshoz közeli részein (ahol a dominancia és a jelszint még jó) megfelelő minőségű C/I mérhető (zölddel jelölve a fenti ábrán), ettől távolodva, illetve a cellahatárok felé közeledve viszont ez az érték egyre rosszabb. Ennek oka, hogy site-on belüli szomszédos cellák is zavart okoznak egymásnak, az interferencia a cellahatárokon a legkritikusabb. A déli irányú cella a site közeli részén bizonyul – a három cella kiszolgálási területén mért C/I közül – a legjobbnak, melynek az az oka, hogy a várostól délre kevesebb zavaró cella van (mint észak-keleti és a nyugati irányban), így onnan kevesebb interferencia jel érkezik a vészhelyzeti állomás felé.

Végeredményben tehát a minőség és interferencia szempontjából sokkal rosszabb eredményre jutottam ennek a módszernek az alkalmazásával, a statisztika a **8. Melléklet**ben található. A 1,185 km²-es teszterület hozzávetőleg 17% -ban mutatott a szimuláció optimális C/I értéket, és 61%-ra nőtt a kritikus értékű minták száma.

Ez az eljárás nem vezetett jó eredményre, ugyanakkor egyéb frekvenciatervezési technika alkalmazásának lehetőségét is meg fogom vizsgálni.

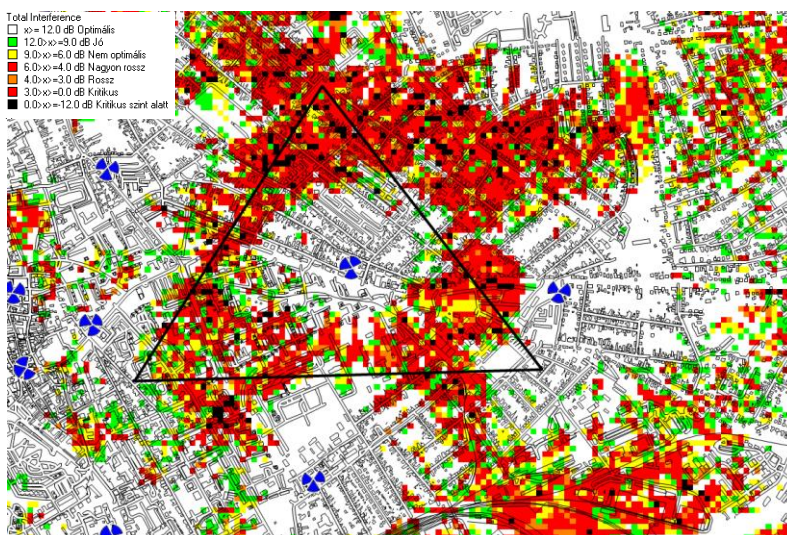
A következő módszerben az előző esetben analizált 1/1 módszert alkalmazva ugyan a frekvenciák az előzőekben bemutatott módon kerülnek kiosztásra, azonban a cellák (illetve azok TRX-ei) különböző időkeretben veszik igénybe a frekvenciákat, javítva ez által az interferencia problémákat. Ez az ún. Mobile Allocation Index Offset (MAIO) használatával valósul meg, amellyel a vészhelyzet cellák hopping-szekvenciájában lévő frekvenciák időbeli eltolással (azaz MAIO-val) kerülnek elkülönítésre. Amennyiben az ideiglenes állomás 3 cellájában ugyanazt a Hopping Sequence Number-t (HSN) allokáljuk, és így azonos hopping algoritmust használ a rendszer mindhárom cella esetén, akkor a

szektorok számára ugyanabban az időpillanatban megegyező frekvenciák kerülnek leosztásra. Ebből következik, hogy mindhárom cella minden időpillanatban interferenciát okoz egymásnak, ezt mutatta be a 22. ábra. A következőkben a site hopping lehetőségét fogom vizsgálni, amely során azonos HSN-t, de minden cella TRX-re vonatkozólag eltérő MAIO-t alkalmazok. Az előzőleg igénybe vett 1/1-es frekvenciatervet (első három sor), valamint a MAIO alkalmazásával történő módosított tervet (utolsó három sor) a 2. táblázat foglalja össze [72]:

2. táblázat A vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es és MAIO-val (pirossal jelölve) alkalmazott frekvenciaterve [Forrás: saját szerkesztés]:

Használt frek.tervezői metódus	Cellaszektor	Antennairány	BCCH	BSIC	TCH frekvenciák	Hopping	HSN	TCH TRX	MAIO eltolás	Össz TRX
1/1-es metódus	1-es szektor	30°	8	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Synthesizer	63	2	-	3
1/1-es metódus	2-es szektor	180°	10	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Synthesizer	63	2	-	3
1/1-es metódus	3-as szektor	295°	6	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Synthesizer	63	2	-	3
1/1-es metódus+MAIO	1-es szektor	30°	8	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Site/Synthesizer	63	2	0, 3	3
1/1-es metódus+MAIO	2-es szektor	180°	10	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Site/Synthesizer	63	2	6, 9	3
1/1-es metódus+MAIO	3-as szektor	295°	6	7.7	11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25	Site/Synthesizer	63	2	12, 15	3

A táblázatban látható, hogy az alsó három cella TCH TRX-e azonos HSN-t és különböző MAIO offszetet alkalmaz, így az azonos időkeretben okozott frekvencia interferencia csökken. Ezt mutatja a lefutott szimuláció is, amelynek végeredményét a 23. ábra mutatja be.



23. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással és a klasszikus frekvenciatervezés helyetti 1/1 metódus használatával, site hopping igénybevételével és MAIO tervezéssel [Forrás: saját szerkesztés]

A 1/1 MAIO eltolás technikával sikeresen szeparáltam az azonos csatornák használatát a bázisállomás három cellája között. A cellán belüli (leosztott frekvenciák közti) szomszédcsatornás zavartatást azonban nem lehet kiküszöbölni ennek módszernek az alkalmazásával, ellenben a hopping nyereség ilyen csatornaszám használata mellett (15 db vivő) nagyobb, mellyel némileg kompenzálható az interferencia. A vészhelyzeti bázisállomás celláinak kiszolgálási területén így megfelelő minőséget lehet biztosítani, ugyanakkor a cellák által okozott interferencia a környező site-ok és azok cellái számára jelentős maradt. A fenti módszerre vonatkozó C/I méréseket a **9. Melléklet**ben foglaltam össze. A vizsgált módszerrel a terület 50%-a kiváló vagy jó minőségűnek bizonyult, 30%-ra csökkentve ezzel a kritikus területek arányát. Ugyanakkor az interferencia szempontjából problémás részek nem csupán a bázisállomás kiszolgálási területén voltak mérhetőek, hanem a cellahatárok felé közeledve és azon kívül is. Ennek az az oka, hogy

minden csatornát felkonfiguráltam a vészhelyzeti site celláira, így az összes környező cellára allokált frekvencia zavart okoz az állomás számára ott, ahol a celladominancia csökkenni kezd (cellahatárok közeledtével). Továbbá megállapítható, hogy a hoppingból adódó nyereségekkel kiküszöbölhető a site-on belüli cellák TRX-einek olyan mértékű (azonos csatornás) zavartatása, mely a hangminőség kritikus rovására menne, vagy a hanghívás megszakadását okozná a terület bizonyos részein. Amennyiben a GPRS/EDGE csatornák a TCH layer időréseiben kerülnek bekonfigurálásra, úgy az EDGE PS adatkapcsolatok kezdeményezésére a bit/hiba arány drasztikus romlása miatt vélhetően nem volna lehetőség a cellahatárokhoz közeli területeken.

A fent ismertetett módszer tehát megoldás lehet arra az esetre, ha vészhelyzeti eseményből adódóan az idő hiánya miatt pontos és klasszikus értelemben vett frekvenciatervezésre nincs lehetőség, valamint prompt szükséges csatornákat allokálni az állomás részére. Ugyanakkor megállapítható, hogy amennyiben a vészhelyzet lokális kiterjedése az ideiglenes cellák ellátási területén túlnyúlnak, úgy a környező celláknak okozott (vagy az azok által jelentett) jelentős interferencia miatt a hangminőség romlásával kell számolni.

A BCCH csatornák vizsgálatával hasonlóan a fejezet végén szintén vizsgáltam, hogy milyen eredményt érhető el, ha forgalmi csatornák részére az élőhálózatban nem használatos, dedikált, kizárólag vészhelyzeti felhasználásra allokált csatornák kerülnek igénybevételre a vészhelyzeti állomás tervezéséhez. Megállapítható, hogy a kiválasztott spektrumon kívüli tiszta frekvenciák használatával mind a BCCH, mind pedig a TCH rétegre vonatkozólag a vészhelyzetre elkülönített dedikált csatornákkal érhető el a legjobb eredmény. A dedikált TCH csatornák használata esetén a környező állomásoknak nem okozható interferencia, valamint azok sem képesek megzavarni a vészhelyzeti bázisállomást, a mérés eredményét a **10. Melléklet** tartalmazza.

Mint azt már a BCCH réteg dedikált csatornákkal való tervezésénél említettem a szolgáltatók számára nem áll rendelkezésre elegendő spektrum az ilyen jellegű vészhelyzeti csatornák elkülönítésére a 900 MHz-es sávban. Egy vészhelyzeti bázisállomás számára (3 szektoros és 3 TRX-es cellák esetén – cellánként 2 TCH TRX-hez) 6 TCH csatornára van szükség. Egy 5 MHz-es spektrumkörnyezetben, összesen 15 TCH csatorna áll rendelkezésre, a dedikált csatornák így a vivőfrekvenciák 40%-át elfoglalnák, amely nem megvalósítható törekvés. Javaslatom szerint egy olyan megoldás kerülhetne számításba, amellyel ezeket a csatornákat – plusz spektrum megléte nélkül – a 4G által használt sáv legalsó és legfelső részével átfedésben volna lehetőség igénybe venni.

Amennyiben az erre vonatkozó tesztek optimális végeredményt adnak, úgy kiváló minőségben válna tervezhetővé a TCH réteg a vészhelyzeti bázisállomások vonatkozásában⁷. Az ezzel járó GSM-4G zavartatás problémája és a módszer használata további vizsgálatokat igényel, ugyanakkor a 4G ezen

⁷ Az ezzel járó GSM-4G zavartatás problémájának vizsgálata további kutatást és tesztet igényel, mielőtt igazolhatóan alkalmazhatónak bizonyulna az eljárás élőhálózati megvalósítása

sávjában az NB-IoT is hasonló megközelítéssel működik [73][74][75][76][77][78][79]. További kifejtést és vizuális magyarázatot a **11. Mellékletben** található.

2.3 Következtetések

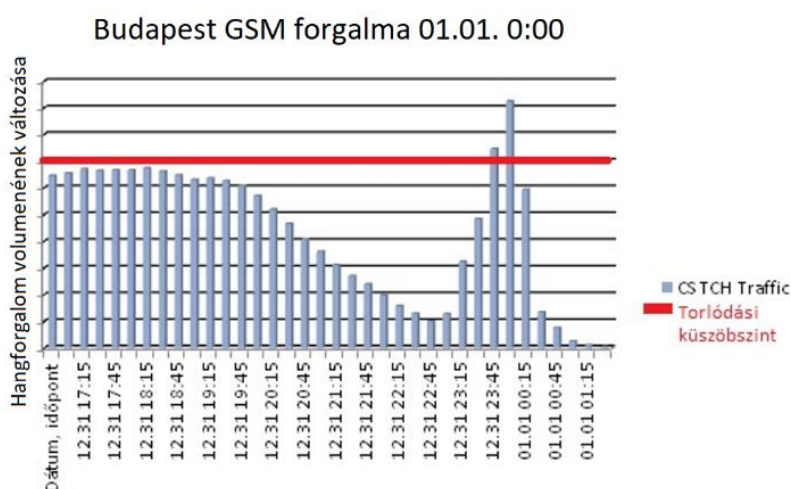
A fejezetben vázoltam a GSM frekvenciatervezés vészhelyzetben való tervezési kérdéseit, valamint bemutattam, hogy a GSM sáv 5 MHz-re való szűkítésével – mely összhangban van a 4G és 5G hálózatok jövőbeli spektrumigényével a 900 MHz-es sávot illetően – is lehetséges optimális minőségben megtervezni egy város bázisállomásait közepes kapacitással (3 TRX-es állomások). Igazoltam, hogy a vizsgálatokhoz megválasztott BCCH/TCH csatornaeloszlás (2 MHz/3 MHz) optimálisnak bizonyult, a városi cellák BCCH és a TCH csatornái megfelelő minőségben megtervezhetőek ezzel a konfigurációval. A frekvenciatervezést annak tükrében végeztem el, hogy a vészhelyzeti bázisállomás egy az élőhálózati frekvenciatervvel hasonló struktúrába legyen beilleszthető, a valósághoz hű konfigurációs környezet kialakítása érdekében. A vészhelyzeti bázisállomás frekvenciatervezésének szempontjából egy komplexebb esetet vettem alapul viszonylag sűrű, városi site elhelyezkedés mellett jól lefedett területen. Megállapítottam és alátámasztottam, hogy a szűkített GSM sávban optimálisan integrálható vészhelyzeti bázisállomás mind a BCCH, mind pedig a TCH csatornákra vonatkozólag. A BCCH réteg tekintetében bizonyítottam, hogy optimális C/I értékek elérésével lehetséges azok tervezését abszolválni, valamint az új site indításával minimalizálni lehet a vészhelyzeti terület interferenciáját, valamint igazoltam, hogy dedikált vészhelyzeti csatornák alkalmazásával további minőségi javulást lehet elérni. A TCH layer szempontjából bizonyítottam, hogy szimulátoros tervezéssel készíthető a legoptimálisabb frekvenciaterv a vészhelyzeti állomás vonatkozásában. Ugyanakkor minden más bevethető frekvenciatervezési eljárást is számba vettem, és arra következtetésre jutottam, hogy egy időben prompt üzembe helyezés esetén a HSN és MAIO tervezéssel történő 1/1-es frekvenciatervezői módszer bizonyul explicit megoldásnak. A TCH rétegre vonatkozólag rávilágítottam a dedikált vészhelyzeti csatornák használatának relevanciájára, valamint ajánlást adtam ennek megoldására a 4G sávba való átfedés technikájával, amely magában foglalja azt a lehetőséget, hogy a TCH layer – plusz rendelkezésre álló spektrum nélkül – kiváló minőségben megtervezhető legyen a vészhelyzeti bázisállomásokra vonatkozólag.

3 KAPACITÁS PROBLÉMÁK VÉSZHELYZETBEN

Ebben a fejezetben a mobil hálózatokat érintő terhelések, azok mértékének változása, valamint a hálózatok kapacitása lesz fókuszban, különös tekintettel annak vészhelyzeti alkalmazására és korlátaira. A mobilhálózatok szolgáltatásainak megbízható alkalmazása fokozottan fontos kritikus helyzetekben. Mivel a rádiós hálózatok kapacitása véges, az átlagos legforgalmasabb órához viszonyított többszörös forgalmat már nem biztos, hogy képesek kezelni – hiába a legjobb hálózat optimalizálási stratégia vagy a maximális felhasználói számot bőven meghaladó kapacitásra történő tervezés. A hálózati problémák, a túlterheltség, a beszéd és adatforgalom kimaradása, lassulása vagy teljes megszűnése miatti

információvesztés a bekövetkezett krízishelyzet súlyosságával arányos, ebben az esetben a szolgáltatóknak és hatóságoknak mindent el kell követniük, hogy a forgalmi problémákat minimalizálják. Magyarországon jelenleg három közcélú mobilhálózat működik, a GSM (2G), az UMTS (3G), és az LTE (4G). Ezen hálózatok egymástól függetlenek olyan értelemben, hogy saját cellákkal rendelkeznek, viszont az egyes technológiák közti átjárás biztosított. A legacy hálózatok implementációját követően a hálózatmodernizációs tevékenységek kapcsán már zajlik a legújabb technológia, az 5G hálózatok kiépítése. Az 5G megjelenése extrém forgalomművekedés kezelésében további megoldást hozhat, illetve – megfelelő kiépítettségi szint mellett– lényeges kapacitás és sebességnövekedést tesz majd lehetővé [52]. A GSM, UMTS és LTE hálózatok különálló rétegenként üzemelnek mind az alkalmazott frekvenciasávok, mind pedig a rádiós technológiák tekintetében, ezért ezek krízishelyzetekben – az adott szituációtól függően – egymást kiválthatják, szükség esetén a kapacitásnövelés céljait szolgálva.

Katasztrófa, vészhelyzet vagy egy terrortámadás esetén a mobilhálózatok használata olyan mértékben változik meg, hogy azt a hálózati rendszerek megfelelő optimalizálása mellett sem lehet minden esetben kezelni. Ilyen esetekben a felhasználószám hirtelen ugrásszerű növekedése miatt a mobilhálózatok elérhetik kapacitásuk korlátját, amely torlódási problémákhoz vezet. Egy ilyen valós helyzetet szemléltet a 24. ábra, amelyen a budapesti GSM forgalom változását láthatjuk 01.01. 0:00-kor szilveszter időpontjában.

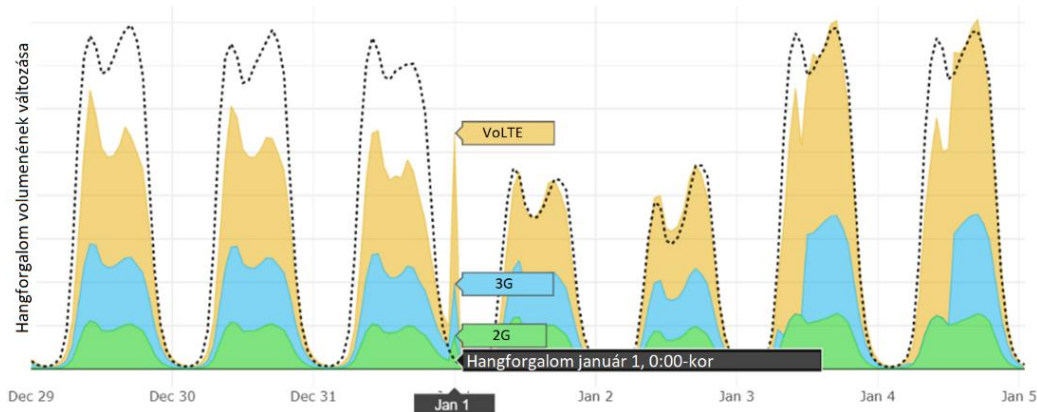


24. ábra A budapesti GSM 900-as forgalom torlódása 01.01. 0:00-kor negyedórás mérésekre bontva [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az ábrán látható, hogy december 31. éjjel közeledtével a GSM hálózat eléri maximális kapacitását és a forgalmi torlódás következik be. Torlódás esetén a beszédhívás vagy adatforgalmazás kezdeményezés sikerességi aránya (Call Success Rate) drasztikusan lecsökken, a kapcsolateldobás (Call Drop) pedig emelkedik. A kritikus helyzetekben tapasztalható hirtelen forgalomművekedés a rendszer kapacitásának határain lényegesen túlmutat.

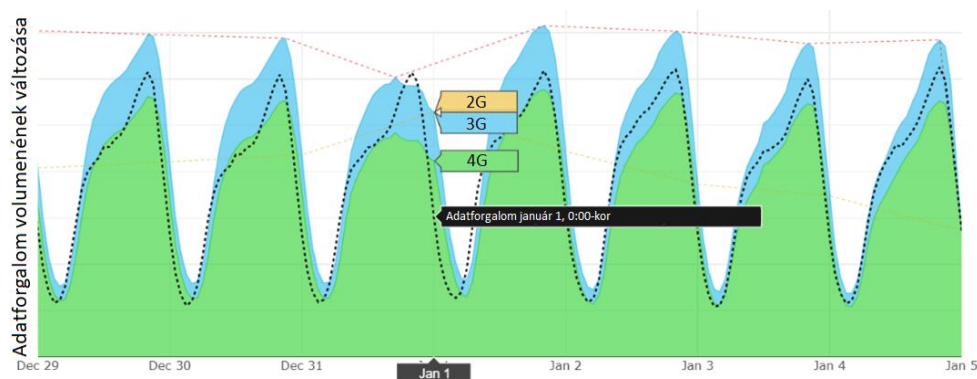
Az LTE hálózat tekintetében is kiugrásokat tapasztalhatunk a fent vizsgált időpontban, 01.01. 0:00-kor az elmúlt napok csúcsaival egyenértékű hangforgalmat mértem a vizsgált hálózaton, mely mind a 4G

(VoLTE), mind a 3G, illetve a 2G tekintetében elérte az előző napok busy hours-ében lebonyolított hangforgalom mértékét egy rövidebb 0,5 - 1 órás időtartamra. A hangforgalom nagyobb része VoLTE-n keresztül zajlott, kisebb része pedig 2G-n és 3G-n végződött (főként a 3G hálózaton). A hangforgalom a napi átlagos peak-el volt egyenértékű, így ebben a vizsgált példában a hálózat azt le tudta kezelni (25. ábra).



25. ábra A vizsgált hálózatra vonatkozó hangforgalom 01.01. 0:00-kor [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Forgalmi kiugrás az adatforgalmat tekintve nem volt tapasztalható a vizsgált speciális időpontban, a felhasználók ilyen esetben hanghívások formájában kívánnak üzenetek bonyolítani. A következő ábrán a 01.01. 0:00-kor mért adatmennyiséget vizsgáltam, az adatforgalom tekintetében semmilyen kiugrás nem volt tapasztalható (26. ábra).



26. ábra A vizsgált hálózatra vonatkozó adatforgalom szilveszterkor 01.01. 0:00-kor [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az adatforgalom eloszlásából adódóan arra lehet következtetni, hogy a felhasználók jellemzően hanghívás formájában kezdeményeztek forgalmat a vizsgált időpontban. A hangforgalom a napi átlagos peak-el volt egyenértékű, így azt a hálózat megfelelően ki tudta szolgálni.

A következőkben a mobil hálózatok a jövő évekre prognosztizálható adatforgalmazási trendjeit fogom vizsgálni. Elsőként az adatfelhasználási szokásokat tekintem át abban a megvilágításban, hogy a vészhelyzeti felhasználók elérésére és kiértékelésére mely platform vonatkozásában jöhet létre a legkézenfekvőbb információs csatorna. Ez követően a Cisco és Ericsson által publikált adatforgalmi trendeket elemzem, amelyet tömegrendezvények és nagyvárosok forgalmi analizisével kívánok igazolni.

A fejezet fókuszában az előhálózati statisztikák vizsgálata áll, mellyel a rádiós hálózatok vészhelyzetben tapasztalható forgalmi és kapacitásbeli kihívásaira kívánok rávilágítani.

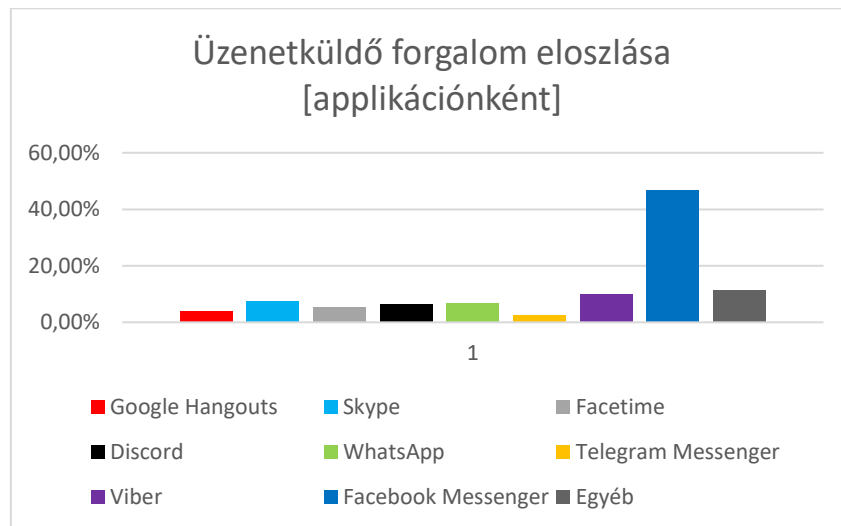
3.1 Vészhelyzeti felhasználók kiértesítésének megoldásai

A hálózati trendek és forgalmak vizsgálatát megelőzően ebben a fejezet részben szeretném áttekinteni a vészhelyzetben érintett felhasználók jelenleg alkalmazott rendszereit, valamint az új platformok jövőbeni alkalmazásának lehetőségeit.

Vészhelyzetben jelenleg nemzetközi szinten egy módja van a lakosság azonnali kiértesítésének, mely az SMS küldésben merül ki a lakossági értesítő rendszeren (PWS) keresztül. A PWS rendszeren keresztül kapcsolódnak az adott országok katasztrófavédelmi szervei a GSM hálózatok SMS küldésért felelős Core hálózati rendszeréhez. Egy esetleges vészhelyzetben tehát az országok belügyminisztériumai a szolgáltatóktól függetlenül tudják igénybe venni a hálózatokat a felhasználók kiértesítésére úgy, hogy ez a publikus hálózati forgalom fölött – prioritást élvezve – történik. A rendszer korlátai közé tartozik a SMS-ek kiküldésének sebessége (meghatározott számú SMS/mp), ez az a maximális SMS kiküldési limitáció, amit a hálózat kapacitása még anélkül elbír, hogy az SMS-ek kiküldése hálózati torlódás okozza. Egy országos érintettségű üzenet eljuttatása tehát időigényes. A rendszer általában úgy kerül kialakításra, hogy az a publikus hálózat SMS forgalmát ne befolyásolja, a rendszer az SMSC helyett direktben az MSS-be kerül integrálásra, minimalizálva ezzel a jelzést váltásokat és a hálózati elemekkel való „találkozást”.

Az SMS értesítés egy lehetséges formája tehát a vészhelyzetben való tájékoztatásnak, ellenben a 21. század felhasználói szokásainak megváltozása révén az adatforgalom egyre hangsúlyosabb szerepet kap, ez által az üzenetküldő szoftverek alkalmazása, illetve az azon történő VOIP hangforgalom is. A VOIP hangforgalom a PS adathálózaton keresztül megy végbe (üzenetcsereelő szoftverek, VoLTE stb.), a klasszikus CS (áramkörkapcsolt) hangforgalom a 2G és 3G hálózatokon keresztül történik. A jelenleg tapasztalható üzenetcsereelő szokások jó indikátor lehet egy jövőbeli rendszer kifejlesztéséhez, mellyel az SMS kiküldésnél – és a kiküldés sebességének korlátaitól mentesen – volna lehetőség a felhasználók kiértesítésre, pl. a jelenleg leginkább elterjedt Whatsapp, Messenger, Skype, Viber stb. platformok segítségével.

A következőkben a vizsgált hálózat egy napi adatforgalmát dolgoztam fel a fent említett platformok alkalmazásának tekintetében. A vizsgált mutató heti és havi eloszlása azonosult a vizsgált naphoz, egyedül a hétvégi időpontokban tapasztalható kiugrás az applikációk használatában, ellenben a platformok alkalmazásának aránya az említett idődimenziókban is közel ugyanazt reprezentálta. Az eredményt a 27. ábra mutatja be.



27. ábra Az üzenetküldő applikációk forgalmi eloszlása [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az eloszlás mértékéből egyértelműen látszik, hogy a legnagyobb arányban alkalmazott üzenetküldő applikáció a Facebook Messenger, melyet a Viber, a Skype, a Whatsapp, a Discord, a Facetime, a Google Hangouts, valamint a Telegram követ ebben a sorrendben. Az egyéb kategória is kiemelkedő eredményt ért el, ugyanakkor ebben a kategórián 10+ kisebb applikáció osztozik, így a befutók sorába ezek nem emelhetők.

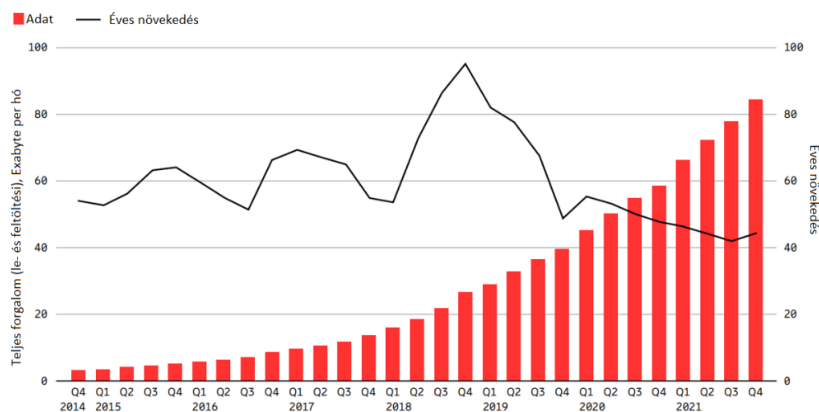
A fenti hálózati analízisből, a vizsgált hálózaton keresztül zajló üzenetküldő applikációk forgalomeloszlásának arányából arra a következtetésre jutottam, hogy a jelenleg leginkább alkalmazott platform a Facebook Messenger. A vészhelyzeti események kapcsán felmerülő SMS tájékoztató rendszeren felül új platformok integrálását volna érdemes megfontolni. A SMS rendszert kiegészítve a korszerűbb és egyre népszerűbb üzenetküldő applikációk is bevonásra kerülhetnek a vállalatokkal való állami szerződések keretében, melyet követően késleltetés nélkül, tömeges üzenetek prompt eljuttatására volna lehetőség a lakosság vészhelyzeti kiértesítésének tekintetében. Így az elavultabb 2G technológiáktól való szoros függőség is feloldódhatna, valamint a vészhelyzeti értesítőrendszerek a szélessávú 4G és 5G hálózatok irányába terelődhetnek, melyen keresztül a vészhelyzeti információk és üzenetek országos szinten valós időben kiküldhetőek lennének az érintett felhasználók számára. A megoldás egyetlen hátránya az adathálózat meglétének feltétele.

3.2 Mobil hálózatok forgalmának prognosztizációja

A mobil technológiák kapacitásának analízisét megelőzően szeretnék arra rávilágítani, hogy a rádiós hálózatok milyen mértékű terhelésnövekedésnek lesznek kitéve a jövőben, melynek segítségével következtethető és prognosztizálható a vészhelyzeti kapacitásigény emelkedés volumene is.

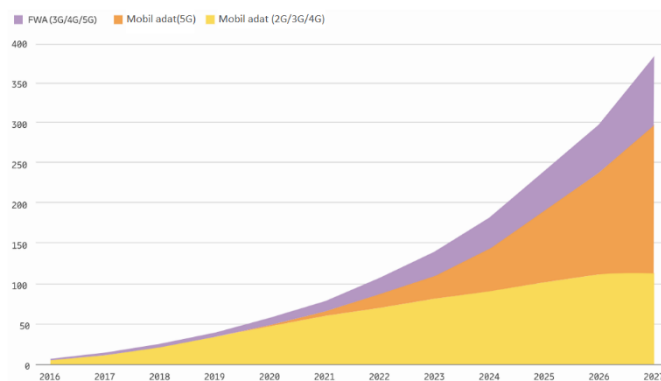
A témában fellelhető forgalmi statisztikák és előrejelzések (pl. Cisco, Ericsson) szerint a mobil eszközök, a mobil kapcsolódások, valamint az adatforgalom is drasztikus növekedésnek néz elébe a következő években (hasonlóan az elmúlt évekhez).

A forgalmi szintek között nagy különbségek vannak a piacok, régiók és szolgáltatók között. A 28. ábra a teljes globális havi hálózati adatforgalmat mutatja 2014 és 2021 negyedik negyedéve között, valamint az éves összehasonlításban mért százalékos változást is tartalmazza. Az előző negyedévekhez hasonlóan 2021-ben ~44 százalékos maradt az éves forgalomnövekedés mértéke, a teljes havi mobilhálózati adatforgalom elérte a 84 exabyte-ot és a negyedévenkénti növekedési ütem 8 százalék körüli volt [80].



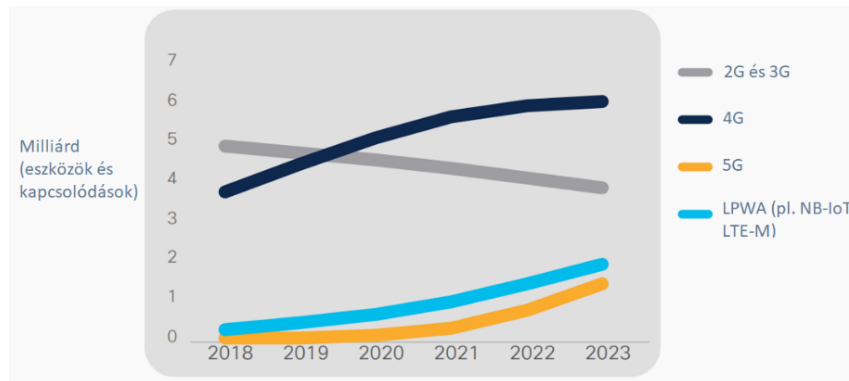
28. ábra Globális mobilhálózati adatforgalom és éves növekedés (ExaByte/hó) [80]

A teljes globális mobil adatforgalom az előrejelzések (29. ábra) szerint körülbelül 4,4-szeresére fog növekedni 2027-re, elérve ezzel a havi 288 exabyte-ot. Az FWA load-al együtt a teljes mobilhálózati forgalom 2021 végére havi 80 exabyte-ra, 2027 végére pedig havi 370 exabyte-ra nő a prognózis alapján, 2027-re az 5G-hálózatok várhatóan a teljes mobil adatforgalom 62 százalékát bonyolítják majd le [81].



29. ábra Globális mobilhálózati adatforgalom jövőbeli alakulása (ExaByte/hó) [82]

A 30. ábra a mobil eszközök és kapcsolódások növekedést ütemezi. A 4G-kapcsolatok 2023-ra az összes mobilkapcsolat 46%-át teszik majd ki, szemben a 2018-as 42%-hoz képest, a globális 4G mobilkapcsolatok száma a 2018-as 3,7 milliárdról 2023-ra 6,0 milliárdra nő ezzel, 10 százalékos CAGR mellett. Az 5G kapcsolatok a 2019-es 13 milliárdról 2023-ra több mint százszorosára, 1,4 milliárdra fognak emelkedni. Az 5G-kapcsolatok számát tovább növeli a mobil IoT penetrációja, 2023-ra így 11% lesz az 5G-képes eszközök és kapcsolatok aránya [83][84]. A 2G és 3G trendek tekintetében a kapcsolatok aránya 2018-ban 55%-on állt, de az előrejelzési időszak végére (2023) a legacy hálózatok aránya 29%-ig fog beesni, sőt Magyarországon ekkora elkezdődik a 3G hálózatok lekapcsolása is [82].



30. ábra Globális mobilkészülék és kapcsolatonövekedés [82]

A fentiek tükrében a meglévő hálózatok kapacitása egyre leterheltebbé válik, a hálózatmodernizációval és az összes 4G frekvencia sáv kiépítésével elérik kiszolgálóképességeik határát. Az 5G hálózatok integrációja és elterjedése még sok évig fog tartani, illetve ezen technológia forgalomvivő képessége is korlátos. A vizsgált előrejelzések tükrében az esetleges vészhelyzetek kezelése egyre nagyobb problémát és kihívást fog jelenteni.

A következő fejezet részben az elméleti trendeket élőhálózati vizsgálatokkal próbálom alátámasztani, valamint tovább vizsgálni.

3.2.1 Adatforgalmi trendek tömegrendezvényeken

A vészhelyzeti szituációk szimulálására a tömegrendezvények a legalkalmasabbak, melyek kis területre összpontosulnak. Az adatforgalom alakulását három tömegrendezvényen és három nagyvárosban gyűjtött adatok alapján elemzem.

A nagyszabású eseményekre – a vészhelyzeti eseményekhez hasonlóan – a mobilszolgáltatók ideiglenes bázisállomásokat telepítenek az átlagosnál magasabb adatátviteli sebesség, kapacitás és minőség biztosítása érdekében, valamint a jó ügyfélművelés és a folyamatos szolgáltatás elérhetőség okán. Ezek az állomások lényegében megegyeznek az értekezésben tárgyalt ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások architektúrájával. A tömegrendezvényekre (például több tízezer résztvevőt számláló fesztiválok) ideiglenesen telepített, kis területre koncentrált hálózat általában olyan kapacitással rendelkezik, amivel egy város igényeit is lehetőség volna kiszolgálni. Ennek tükrében az ilyen rendezvények forgalmi adatai egyrészt jó előrejelzést adnak az élő mobilhálózat átlagos éves növekedésére, és visszajelzéssel szolgálhat az előző fejezetben vizsgált trendek és előrejelzések vonatkozásában, valamint segíthet megérteni a vészhelyzetben kialakuló immenzis kapacitásnövekmény kezelésének metodológiáját. Az elemzett eseményeken 45 – 100 ezer látogató vett részt, akik lényegében egy időben voltak jelen. Mivel ilyenkor rengeteg felhasználó koncentrálódik kis területre, így a mobilszolgáltatók extrém kihívás elé vannak állítva abban a tekintetben, hogy megfelelő minőségben és a szolgáltatás megszakítása nélkül kezeljék az igényeket. Az elemzés során a szélessávú mobilhálózatok (3G, 4G) kerültek a középpontba. A 2G hálózatot nem elemeztem, mivel a 2G hálózat által kezelt adatforgalom elhanyagolható a szélessávú hálózatokhoz képest. Az elemzést 2015 és 2017 között végeztem, továbbá az a közelgő lekapcsolás

ellenére a 3G hálózatot is érinti, mert a technológia emelkedésének mértéke reprezentatív lehet a jövőben prognosztizálható éves növekedési léptékek tekintetében is.

A vizsgált tömegrendezvényeken small cellás (alacsony magasságra telepített antennás) rendszer került kiépítésre, ahol egy kis kiterjedésű területre nagy forgalom koncentrálódik. Az ehhez hasonló rendszerek illusztrációját a 31. ábra szemlélteti.

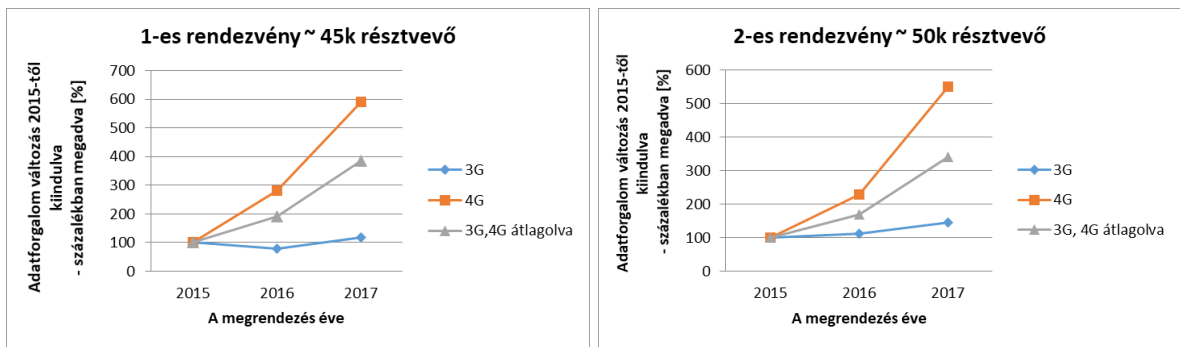


31. ábra Illusztráció egy tömegrendezvényre telepített bázisállomások lehetséges elrendezésére, a szektorok feltüntetésével [Forrás: saját szerkesztés]

Az analízis alá vett rendezvények közül a vizsgált 1-es rendezvény időben 5 napig tartott, területi kiterjedése $0,12 \text{ km}^2$ -t volt, továbbá 45 ezer látogatót fogadott (akik egyszerre voltak jelen). A 32. ábra az event adatforgalmi növekedését mutatja. A diagram a 2015-ös eredmények dimenziójával kezdődik, illetve az analízis az ezt következő két év adatforgalmi eredményére terjed azt százalékos arányban kimutatva. A táblázat a letöltési és feltöltési adatokat összesítve tartalmazza, külön-külön és kumuláltan is mutatja a 3G és 4G hálózati forgalom változását.

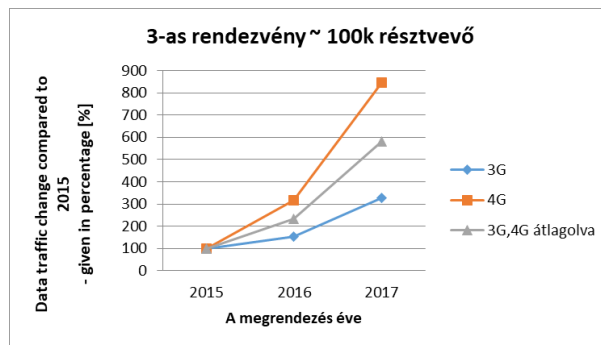
A 2. esemény nagyobb terület kiterjedéssel rendelkezett, a földrajzi méretet tekintve kb. $0,17 \text{ km}^2$ -t ölelt át, a felhasználók száma tekintve pedig hozzávetőleg 50 ezer embert érintett (egy időben ott tartózkodók), és 4 napig tartott. A rendezvény statisztikáját 33. ábra szemlélteti három év vonatkozásában.

A 3. esemény kb. $\sim 1 \text{ km}^2$ -es területen zajlott, 100 ezer résztvevővel, valamint 7 napig tartott. A mobilhálózat kapacitása szempontjából (a felhasználó számból adódóan) ez a rendezvény került a legnagyobb terhelés alá. A rendezvény adatforgalmi változását az 34. ábra mutatja be.



32. ábra Adatforgalom változás – 1-es rendezvény (bal oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

33. ábra Adatforgalom változás – 2-es rendezvény (jobb oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]



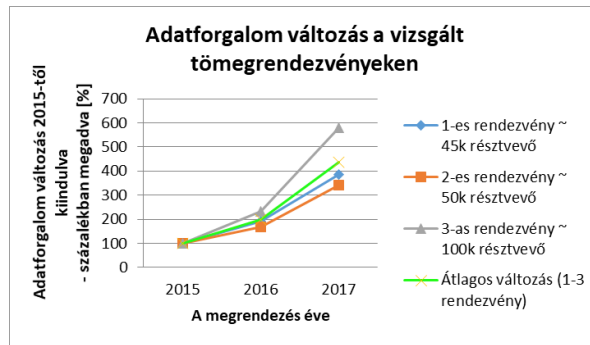
34. ábra Adatforgalom változás – 3-as rendezvény [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A teljes adatforgalom – a 3G és a 4G hálózat tekintetében – 2015-ről 2016-ra az 1-es esemény esetében 1,9-szeresére, 2016-ról 2017-re pedig 2-szeresére nőtt. Ez a terhelés leginkább a 4G hálózatot érintette. A 3G hálózat adatforgalma 2016-ban 2015-höz képest visszaesett, 2017-ben pedig 2016-hoz képest némileg nőtt (a 2017-es terhelés meghaladta a 2015-ben tapasztalt adatforgalom mennyiségét). A 4G hálózat adathasználata 2015-ről 2016-ra több mint 2,8-szorosára nőtt, 2016-ról 2017-re pedig megduplázódott.

A 2-es esemény adatforgalma – az 1-es eseményhez hasonlóan – 2015-ről 2016-ra körülbelül 1,7-szeresére nőtt, 2016-ról 2017-re pedig megduplázódott. A 3G forgalom kisebb mértékben, a 4G forgalom viszont jelentősen nőtt.

A 3-as esemény adatforgalma 2015-ről 2016-ra megduplázódott, és 2017-re a 3G és 4G adatforgalommal együtt majdnem 2,5-szeresére nőtt. A 4G hálózat 2016-ban 2,3-szor több adatot került átvitelre, mint 2015-ben, 2016-ról 2017-re pedig 2,6-szorosára nőtt a forgalom.

Az alábbi összefoglaló (35. ábra) alapján megállapítható, hogy minél nagyobb számú felhasználó vett részt a rendezvényeken, annál nagyobb éves forgalomművekedés volt tapasztalható. Az elemzett események adatai legalább évi kétszeres adatmennyiség növekedést mutatnak.



35. ábra Az elemzett tömegesemények adatforgalmának változása - 2016, 2017, 2015-höz képest (a növekedés százalékban van megadva) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A fentieknek megfelelően - a 4G hálózaton intenzív növekedés, a 3G hálózaton pedig minimális növekedés vagy kisebb csökkenés volt tapasztalható 2016-ban és 2017-ben 2015-höz képest. A 4G végberendezések penetrációja évről évre nő, a csak 3G-képes telefonok száma csökken, ezért több adat kerül forgalmazásra a 4G szélessávú mobilhálózatokon keresztül.

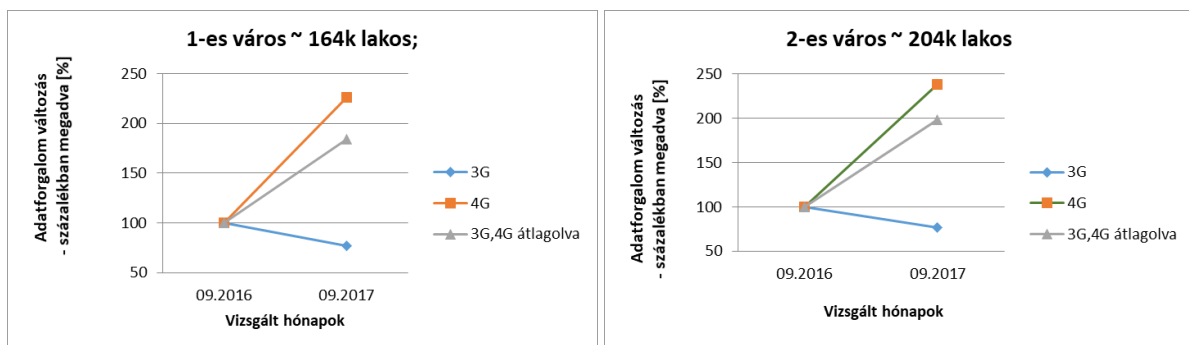
3.2.2 Nagyvárosok adatforgalma

Három nagyvárost (1-es város, 2-es város és 3-as város) vizsgáltam az adatok eloszlása szempontjából. A mintavételre szeptemberben került sor, mely időintervallumot 2016-ban és 2017-ben is elemeztem.

Az 1-es város földrajzi mérete 280,8 km², lakossága 164 ezer fő körül alakult. Az 36. ábra az 1-es város szeptemberi adatforgalmát mutatja az elmúlt két év tekintetében (a növekedés százalékban van megadva).

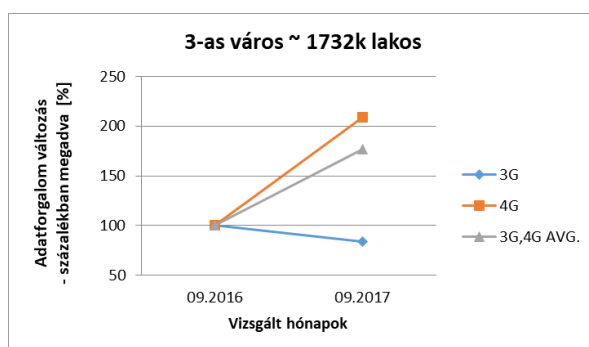
A 2-es város 461,2 km² területen helyezkedik el, lakossága 204 ezer fő. A 2-es város adatforgalmi változását a 37. ábra mutatja a mintavételi hónapok tükrében.

A 3-as város (területe 525,2 km²) lakossága 1732 ezer fő, a vizsgálat eredményét és a kapott adatokat a 38. ábra szemlélteti.



36. ábra Az 1-es város adatforgalmi változása (bal oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

37. ábra Az 2-es város adatforgalmi változása (jobb oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]



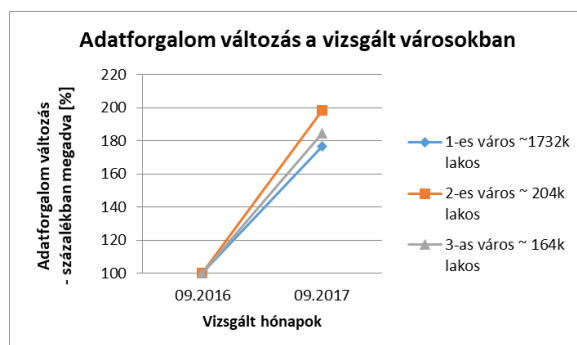
38. ábra A 3-as város adatforgalmi változása [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A 1-es város adatforgalma 1,8-szorosára nőtt a 2016. szeptemberi adatokhoz képest 2017 azonos hónapjához hasonlítva. A 3G adatforgalom használata 20%-kal csökkent, míg a 4G hálózat használata jelentősen nőtt. A 4G-n történő adatforgalom 2017 szeptemberében több mint 2,2-szerese volt az egy évvel korábbihoz képest.

A 2-es város adatforgalma is növekedést mutat 2017-ben, közel 2-szer nagyobb forgalmat bonyolítottak le 2017-ben, mint 2016-ban. Ezt a 3G forgalom több mint 23%-os csökkenése, míg a 4G hálózat közel 2,5-szeres növekedése mellett volt detektálható 2017 szeptemberében.

A 3-as város adatforgalma 2017 szeptemberében közel 80%-kal nőtt 2016 azonos hónapjához képest. A 3G-n több mint 16%-kal csökkent az adatforgalom, így a 4G hálózaton több mint kétszer akkora forgalom bonyolódott 2017-ben.

A nagyvárosok adatforgalmának növekedését a 39. ábra foglalja össze.



39. ábra A legnagyobb városok adatforgalmának változása 2016 szeptemberéhez képest 2017 szeptemberében [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az élő hálózati eredmények alapján megállapítható, hogy a nagyvárosok tekintetében az éves forgalom 2017 szeptemberében mintegy 80%-kal nagyobb volt, mint 2016 szeptemberében. A legsűrűbben lakott városban kisebb mértékű, de szintén jelentős adatforgalom-növekedés volt tapasztalható.

A vizsgált eseményeken a 3G hálózatok kihasználtsága enyhén nőtt, és csak egy esetben csökkent a vizsgált években, míg a 3G forgalom – a vizsgált városokban – a mintában szereplő hónapban figyelemre méltó csökkenést mutatott. A 4G hálózaton jelentős és megállíthatatlan növekedés volt tapasztalható a tömegrendezvényeken és a nagyvárosokban is. Az élő hálózatelemzés eredményei –

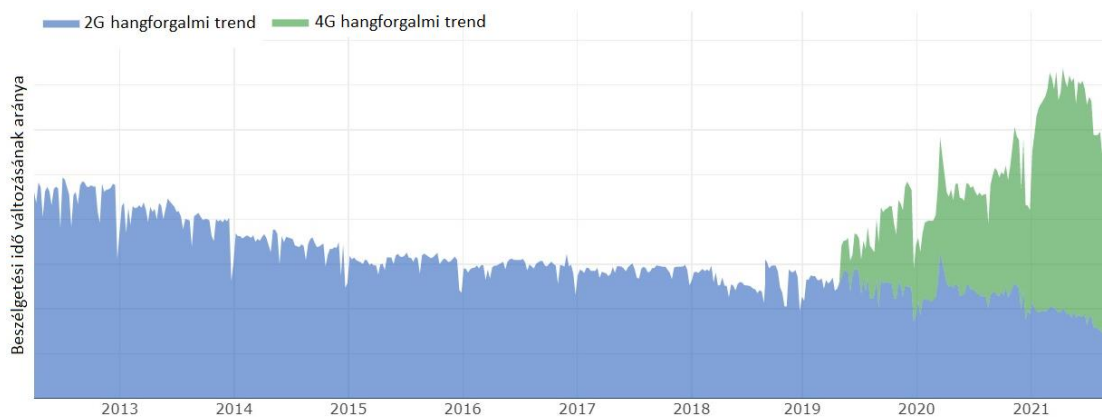
bár időben eltérő dimenziót vizsgáltak, de – összhangban vannak a korábban vizsgált forgalmi trendekkel a 4G tekintetében.

3.2.3 2G és 4G hálózati (hang és adat) forgalom

A 2G és 4G hang és adatrendek analíziséhez olyan hálózatokat vizsgáltam, melynek eredményei reprezentatívak és magas felhasználószám által produkált eredmények halmazának tekinthető. A 2G hálózatok kihasználtsága a 4G megjelenése óta egyre csökken. A 4G hálózatokon történő hangforgalom (VoLTE) bekapcsolásával, valamint a 4G képes terminálok penetrációjával a hangforgalom folyamatos átcsoportosítása történik a 4G hálózatok felé, jelenleg Magyarországon a hangforgalom kb. 2/3-a már az 4G hálózatokon keresztül zajlik.

Ugyanakkor vészhelyzeti szempontból a 2G hálózatok továbbra is és még hosszú ideig fontos szerepet fognak betölteni a 4G hálózatok mellett. A 2G továbbá kizárólagos hangszolgáltatást nyújtó technológiaként működik azon felhasználók számára, akik elavult, csak 2G-t használni képes terminállal rendelkeznek, vagy olyan helyszíneken, ahol nincs 4G lefedettség, de a 2G lefedés biztosított. A 3G hálózatok lekapcsolása 2022 és 2023 környékén elkezdődik Magyarországon és valószínűleg más nemzetek operátorai is hasonlóképpen fognak dönteni, így ez a technológia irreleváns a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából jelen vizsgálat fókuszában.

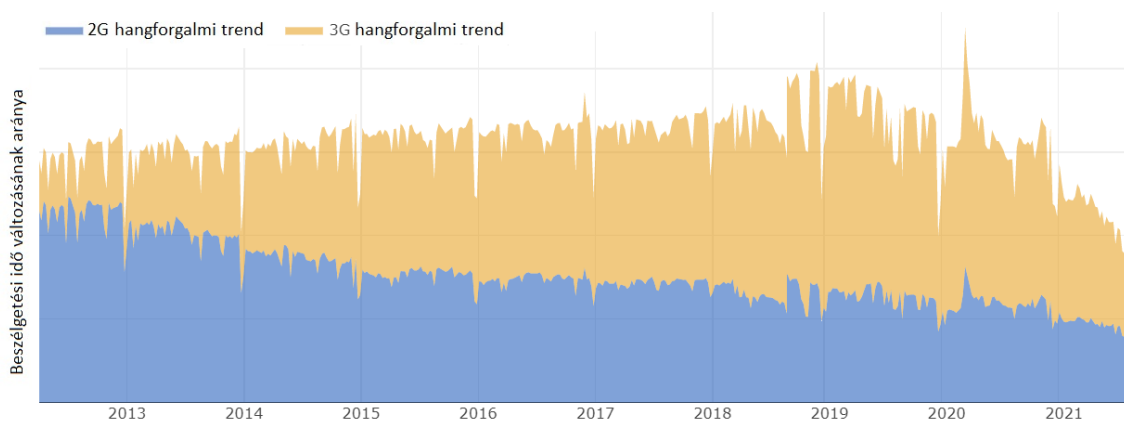
A 2G hálózat hangforgalmának alakulását a lenti grafikon (40. ábra) szemlélteti. Látható, hogy a trend folyamatos csökkenést mutat, amely már jóval a VoLTE (2018 - 2019) bevezetése előtt elkezdődött. A 4G hálózaton történő hangforgalom évi kb. 50%-al nő, míg a GSM hálózat hozzávetőleg 25%-os csökkenést mutat.



40. ábra 2G hangforgalom trendje, 4G hangforgalom trendje [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A 2G hálózat hangforgalmának 2013-tól tartós csökkenése a 3G hálózatok megjelenésének volt köszönhető, melyet az utóbbi években a 4G VoLTE penetráció nyomatékosított. Ugyanakkor a 2G hálózatok még mindig jelentős forgalmat kezelnek a 4G hálózatok mellett, valamint az országos lefedettségük is az egyik legkiterjedtebb a különböző generációs hálózatok közül. Továbbá a 3G várható lekapcsolásával predesztinálhatóan még nagyobb teher hárul majd erre a technológiára, tömeges kapacitásbővítéseket is indukálva magával [85]. Ugyan a kutatásomból a 3G hálózatok vizsgálata ezen fejezet kivételével nem került fókuszba, a forgalmi trendek megértéséhez szükség van a bemutatásukra.

A lenti grafikonon (41. ábra) a 2G hálózatok hangforgalmának csökkenése figyelhető meg a 3G hálózatok elterjedésével.

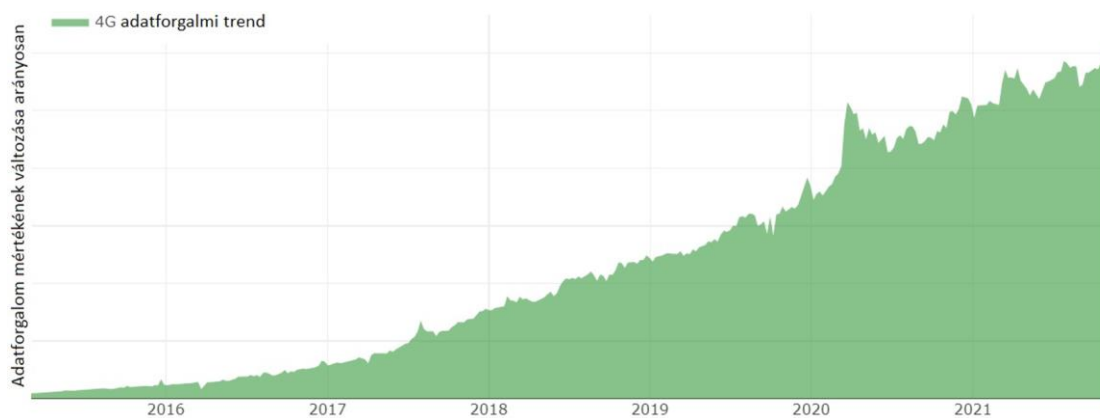


41. ábra Hangforgalom alakulása 2G és 3G együtt [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az adatforgalmi trendeket illetően hasonló eredményekre jutottam. A 2G hálózat EDGE/GPRS forgalma folyamatos csökkenést mutat (42. ábra), míg a 4G adatforgalom folyamatosan nő. Ezúttal is csak arányokat fogok megosztani, fontos megjegyezni, hogy a 2G és 4G adatforgalmának dimenziója nem áll korrelációban egymással, a 4G hálózat sok nagyságrenddel nagyobb mértékű payload-ot mutat 43. ábra.



42. ábra 2G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

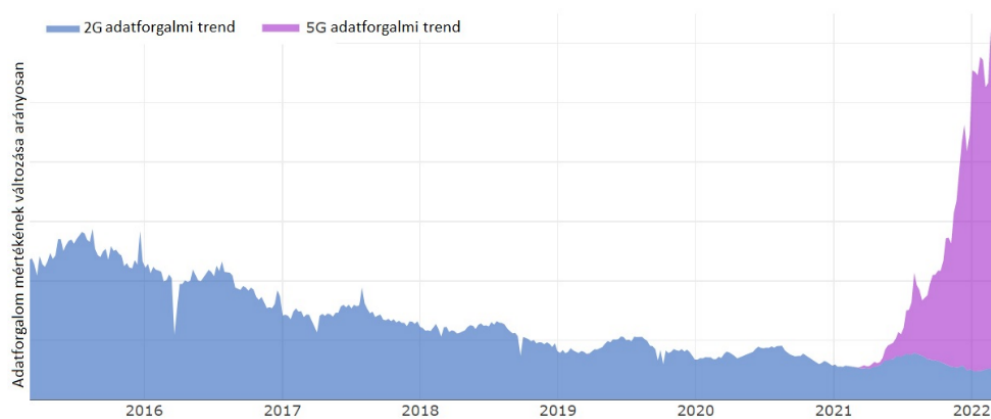


43. ábra 4G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Megállapítható, hogy a 2G adatforgalom folyamatos csökkenést mutat, elavult technológia révén a GPRS és EDGE már nem képes kielégíteni még egy átlagos böngészési (browsing) élményt sem, így a

felhasználók ma már csak kizárólag olyan helyszíneken veszik igénybe ezt a szolgáltatást, ahol sem 3G, sem pedig 4G technológia nem elérhető el (minimális csomagok továbbítására mint pl. egy Whatsapp vagy egy Messenger üzenet). A 4G hálózatok adatforgalma ellenben folyamatos növekedést mutat (43. ábra), éves kb. 25%-os emelkedés tapasztalható e tekintetben, míg a 2G hálózatokon kb. 17%-os csökkenés látszik.

A 2G hálózatok adatforgalmának csökkenését és az 5G hálózatok terhelésének növekményét egy grafikonra illesztve (44. ábra) a következő eredményt látszik.



44. ábra 2G és 5G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

Az 5G adatforgalma robbanásszerű növekedésnek indult 2021 közepétől, holott a kiépítettsége viszonylag még csekély.

Összegezve tehát kijelenthető, hogy a vizsgált hálózatokon a hangforgalom 70%-a 4G-n keresztül zajlott, 20% a 3G hálózatokon végződött, a 2G technológia pedig csak 10%-ot kezelt a vizsgált időpontban.

Az adatforgalom tekintetében megállapítható, hogy az adatforgalom több, mint 95%-a már 4G hálózatokon történik meg. Továbbá az éves növekedés mértéke meghaladja a 20-25%-ot, egyes fogalom szempontjából intenzív területeken nem ritka az 50%+ éves forgalommnövekedés.

A bemutatott eredmények az adatforgalom jelentős növekedését prognosztizálják mind vizsgált előrejelzésekben, mind pedig az élő hálózati elemzésekre vonatkozólag. A tömegrendezvények és a vizsgált nagyvárosok forgalmának elemzése útmutatást adott arra vonatkozólag, hogy egy jövőbeli vészhelyzet során milyen éves kapacitásigény emelkedésre és ebből adódó torlódásokra lehet felkészülni. A következtetések szerint tehát a várható adatforgalom emelkedés miatt szolgáltatók hálózatai jelentős terhelés emelkedésnek lesznek kitéve a jövőbeli vészhelyzetek során, továbbá az analízis alapján megállapítható, hogy a vészhelyzeti forgalmak lekezelése folyamatos hálózatfejlesztési projektek mellett is óriási kihívást jelent. A vészhelyzetek forgalmi kezelését tovább nehezíti az ilyen helyzetben uralkodó pánikhangulat, mely olyan mértékű forgalommnövekedést képes generálni, mely a hálózati forgalom torlódását okozza. Az 5G kiépítésével jelentős kapacitásnövekményre lehet majd szert tenni a vészhelyzeti kommunikáció tekintetében [86].

3.3 Kritikus kapacitásproblémák élőhálózati analízise

Az értekezés ezen részében arra kívánok rávilágítani, hogy egy esetleges vészhelyzet kapcsán a jelenlegi bázisállomás konfigurációk mennyiben képesek kezelni a vészhelyzeti szituációkat. A feltételezésem szerint az esetek nagyobb részében a cellák terheltségének jelentős megnövekedése mellett, akár több GSM és LTE layer megléte mellett sem lehetséges megfelelően kiszolgálni a vészhelyzeti eseményben érintett felhasználókat [76]. Ebben a fejezetben élőhálózati adatokat elemezve kívánok részletesebb betekintést nyújtani a vészhelyzeti események során tapasztalható forgalom alakulásáról a hálózati paraméterek elemzésén át, valamint az elérhető cellakapacitásokat vizsgálni hálózatoptimalizáló szemszögből. Ahogyan azt már a disszertáció több fejezetében említettem vészhelyzetben a felhasználói szokások drasztikusan megváltoznak, a felhasználók egyszerre próbálnak hang és adatszolgáltatásokat igénybe venni. Ez a reakció a segítségkérés, valamint a vészhelyzetből való megmenekülés felé irányuló normális emberi reakció, ellenben a vészhelyzetben érintett mobilcellák az ilyen mértékű, adott pontba vagy területre összpontosított forgalomnövekedésre nincsenek minden esetben felkészítve, és így torlódások és kapacitásproblémák jelentkezhetnek. A szolgáltatók modernizációja, ezzel együtt a 700 MHz-es LTE layer integrációja, a GSM egy részének és 3G 900 MHz-es frekvenciáinak az LTE 900 MHz-re való átforgatása jelenleg is zajlik, valamint a 2100 MHz-es 3G frekvenciák LTE 2100 MHz-re való allokációja szintén folyamatban van. A modernizáció végére, mely akár egyes szolgáltatók esetében akár még 2025-ig is eltarthat, már 6 LTE layer lehet lokalizálható cellaszektoronként (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz), ami a jelenlegi kapacitás dupláját/háromszorosát is jelentheti. Ennek ellenére a folyamatos forgalomnövekedésnek köszönhetően egy vészhelyzeti esemény során a torlódások és kapacitásproblémák még a későbbiek során is relevánsak és egyre kritikusabbak lesznek. Ez a helyzet a modernizációs folyamat végéig még rosszabb helyzetet fest, ennek tükrében a probléma megoldása sürgetőbb, mint valaha. A kapacitási tényezők vizsgálata során is fontos, hogy az egyes szolgáltatók különböző helyszíneken különböző mértékű kapacitással vannak felszerelve annak tükrében, hogy az adott operátor üzleti és felhasználó-forgalmi igénye azt miként alakította a múltban, valamint arra vonatkozólag is, hogy a modernizációs projektet miként és mikor ütemezik az ország területén.

A lentiekben a torlódó cellák vizsgálatával fogok következtetni a vészhelyzeti esemény során magas terhelésnek kitett cellák reakcióira, jobban megértve a hálózatok kapacitását, azok határait, majd ezek elemzésével megoldást keresek a vészhelyzetben tapasztalható kapacitásproblémákra. A fejezetben a 3G hálózatokat nem vizsgálom, valamint az 5G alacsony kiépítettségének és terminál támogatottságából, valamint kis mértékű átmenő forgalomból adódóan szintén nem elemzem. Kizárólag a jelenlegi és a jövő évek prognosztizálható kapacitásait fogom elemezni (2G és 4G fedő, valamint kapacitás rétegei).

A publikus mobilhálózatok kritikus helyzetekben előforduló kapacitás problémáinak megértéséhez elengedhetetlenül szükséges, hogy a kapacitástervezés folyamatát hálózatokra bontva, röviden felvázoljam. A lentiekben a GSM és LTE cellák kapacitásának határaitra vonatkozólag teszek közelítést.

3.3.1 Kapacitástervezési szempontok 2G hálózat esetén

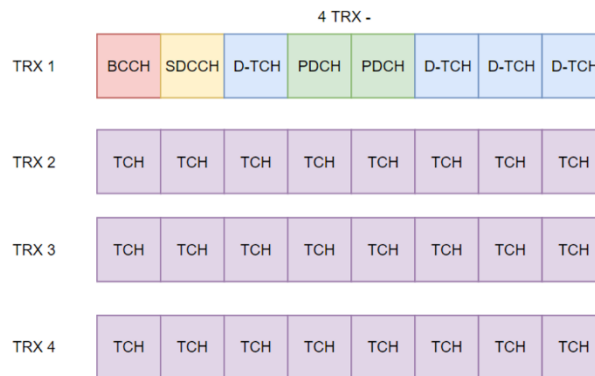
A GSM hálózat egy frekvencia duplex (FDD) rendszer (900 és 1800 MHz-es frekvenciatartományban), amely frekvencia és időosztásos hozzáférési technológiával működik. A bázisállomás (BTS) TRX, azaz az adó-vevő egységében 8 db időrés konfigurálható egy vivőfrekvenciára downlink (letöltési) és uplink (feltöltési) irányban. Egy időrésben egyidejűleg egy hanghívás kezelhető, de további hálózat optimalizálási funkciók használatával ez a kapacitás növelhető. A GSM rendszer is alkalmas adatforgalmazásra EDGE szabvány segítségével, mely egy elavult technológia és csak alacsony adatátviteli sebességre képes, mára már a legalapvetőbb felhasználó igényeket sem képes kielégíteni.

Az adott bázisállomásoknál alkalmazott TRX száma határozza meg a bázisállomás kapacitását. Az Erlang B tábla segítségével az előre meghatározott blokkolási arány, a várható forgalomeloszlás és adatforgalom mentén meghatározható az adott cella kapacitása. Minden TRX különböző vivőcsatornán kerül kisugárzásra, egy csatorna 200 KHz sáv szélességű, melynek megválasztása a (2-es fejezetben ismertetett módon) rádiós frekvenciatervezéssel történik.

A mobil szolgáltatók a kapacitás tervezésekor általában egy átlagos nap legnagyobb forgalmú időszakára (óraira) számolnak (busy hour). Egy adott cella kapacitásának maximuma a TRX-ek számától függ, ha további kapacitásnövelésre van szükség, erre az alábbi módokon van lehetőség:

- Hálózat optimalizálással és/vagy forgalomtereléssel más technológiákba:
 - Ez a központból a hálózatmenedzsment funkció segítségével kivitelezhető;
- Cellaméret csökkentésével:
 - A cellaméret csökkentése az antenna kimeneti teljesítményének csökkenésével, vagy az antenna dőlésszögének megváltoztatásával (tilt) érhető el. Ezzel a megoldással ugyanaz a forgalom kisebb területre fókuszálható, és torlódás esetén a kapacitást meghaladó forgalom a szomszédos cellákba terelhető át. Ez szintén a hálózatmenedzsment funkció segítségével kezelhető.
- További TRX-ek indításával:
 - A bázisállomások bekonfigurálható maximális TRX-einek száma gyártóspecifikus. A normál forgalmi időszakban nem szükséges az összes TRX-et aktív módban üzemeltetni.
- Kapacitáscellák indítása a tehermentesíteni kívánt cella vivősávjától eltérő frekvencián (900 MHz, 1800 MHz).

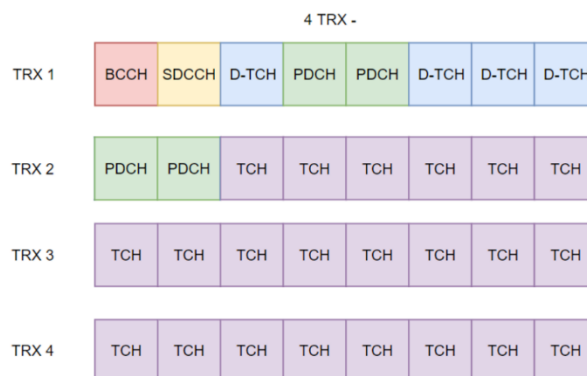
A következőkben (45. ábra) egy általános csatorna elrendezést látható a BCCH TRX-ek (TRX1), valamint a TCH TRX-ekre vonatkozólag (TRX2 - TRX4).



45. ábra BCCH és TCH TRX-ek egy lehetséges konfigurációja [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A Broadcasting TRX 1 tartalmazza a hívásfelépítésért felelős időréseket (BCCH + SDCCH). A BCCH egy olyan szóró csatorna, amelyet a bázisállomás használ a hálózattal kapcsolatos információk küldésére. Az SDCCH csatorna, a mobil hálózati kapcsolat létrehozását és a csatornakiosztást követő jelzési információkat hordozza, valamint kapcsolatot biztosít a jelzésváltások (hívásfelépítés) és az SMS üzenetek számára. A fent szereplő konfigurációban forgalmi és PDCH (Packet Data Channel – GPRS/EDGE) csatornák is allokálásra kerültek a BCCH TRX-re. Az általános beállítások alapján a hívásindítást és felépítést követően a TCH csatornák veszik a forgalom kezelését (TRX2 – TRX4; 4TRX-es GSM cella esetén), hogy a BCCH TRX tehermentesítve legyen a következő felhasználó legjobb performanciával való kiszolgálása érdekében.

Azon elrendezési logika viszont talán optimálisabbnak tekinthető, amennyiben a BCCH TRX-en keresztül minimális vagy semmilyen beszédforgalom nem zajlik (kizárólag hívásfelépítés), s amellyel a TCH TRX-eken (vagy azokon is – TRX2-TRX4) engedélyezve van a csomagkapcsolt adat (PDCH időrések), tehát a BCCH és TCH layer közt oszlik el az adatforgalom. A dinamikus időrés allokáció funkció használatával a többlet PDCH erőforrásokat csak akkor veszi igénybe a rendszer, ha azt a hangforgalom alakulása megengedi (a hangszolgáltatás prioritást élvez az adatkapcsolattal szemben). A bit/hiba arány a BCCH csatornákon jobbnak tekinthető (tisztább frekvenciák a nagyobb reuse-nak köszönhetően), ellenben a forgalmi csatornák kapacitása jobban megengedi az EDGE forgalmat. Ez a konfigurációt mutatja 46. ábra.



46. ábra BCCH és TCH TRX-ek egy lehetséges konfigurációja a PDCH csatornák TCH-k közé konfigurálásával [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]

A napi legforgalmasabb órák (busy hours) a TCH csatornák vonatkozásában általában a munkaidő után mérhetőek, az SDCCH forgalom esetén pedig általában a reggeli órákban (be és kikapcsolás és gyakori jelzés-váltási update-ek).

Az Erlang egy hangátviteli útvonal folyamatos használatát jelenti, egy óra teljes forgalmi mennyiségének leírására szolgál.

$$[\text{Forgalom egy óra alatt}] = [\text{Hívások száma}] \times [\text{A forgalmazott percek száma egy óra alatt}] \quad (2)$$

- Ha egy felhasználói csoport egy óra alatt 30 hívást bonyolított le;
- Minden egyes hívás átlagos időtartama 5 perc volt;
- Forgalmazott percek egy óra alatt = $[30] \times [5] = 150$ forgalmazott perc.

$$[\text{Forgalom egy óra alatt}] = \frac{150}{60} = 2,5 \text{ Erlang}$$

Előfizetónként kiosztott átlagos forgalom számítása releváns, amennyiben a cella által kiszolgálni képes felhasználószámot kívánjunk definiálni. Ehhez a kalkulációhoz az alábbi bemeneti információk szükségesek, melyek statisztikai átlagokból határozhatóak meg:

$$[\text{Erlang per user}] = \frac{[\text{Egy felhasználó által forgalmazott átlagos percek száma egy hónapra vetítve}]}{[(\text{Napok száma per hó}) \times (\text{Busy hour per nap}) \times 60]} \quad (3)$$

- Egy felhasználó által forgalmazott átlagos percek száma egy hónapra vetítve: ~180 perc;
- Busy hour per nap: ~4 óra;
- Napok száma per hó: 30 nap;

$$[\text{Erlang per user}] = \frac{[180]}{[(30) \times (4) \times 60]} = 25 \text{ mErlang}$$

Egy felhasználó által generált átlagos forgalom tekintetében tehát 25 m Erlang-ot veszek alapul. Az SDCCH forgalom vonatkozásában kb. 3,56 - 4,4 mErlang-al számolok [87][88].

GOS (Grade of Service) a hívások blokkolásának vagy torlódásának valószínűségét jelenti, amikor egy hívás egy-egy meghatározott időintervallumnál hosszabb ideig blokkolva vagy késleltetve lesz. Ez általában a busy hours-ben történik meg, amikor a legnagyobb a forgalom intenzitása. Ezzel a mutatóval is számolni kell a kapacitás tervezésekor. A 2%-os blokkolás azt jelenti, hogy 100 hívásból 2 hívás hiúsulhat meg. A GOS-t illetően 2%-os blokkolási értékkel számolok.

Egy általános nagyvárosi állomás esetében, ahol az adott bázisállomás szektorai 2 TRX-esek, úgy egy szektor körülbelüli kapacitását a következőképpen kaphatom meg, amennyiben az időrés allokációk közül a 45. ábra szerint járok el és ugyanilyen konfigurációval dinamikus időrés allokációt használok.

- $[2 \text{ TRX}] \times [8 \text{ időrés}] = 16 \text{ időrés};$
- $[16 \text{ időrés}] - [1 \text{ BCCH}] - [1 \text{ SDCCH}] - [2 \text{ PDCH}] = 12 \text{ TCH (forgalmi) időrés};$
- 12 TCH (forgalmi) időrés áll összesen rendelkezésre egy 2 TRX cella esetén.
- Erlang B tábla alapján 2 %-os GOD mellett tehát egy 3 szektoros 2 TRX-es állomás (12 TCH időréssel) szektoronként 6,61 Erlang forgalmat képes kezelni, a 3 szektoros bázisállomás pedig összesen 19,83 Erlang-ot;

- Ha ezt elosztom az egy előfizető által forgalmazott átlagos Erlang mennyiséggel (25 mErlang), úgy megkapom, hogy $\frac{6,61 \text{ Erlang}}{25 \text{ mErlang}} = 265$ előfizető kiszolgálására képes egy cella, valamint $\frac{19,83}{25 \text{ mErlang}} = 793$ felhasználó egyidejű ellátását teszi lehetővé a 3 szektoros bázisállomás jó hangminőség mellett (Full Rate beszédkodek használatával, Half Rate forgalom nélkül).
- Az SDDCH forgalom az egy felhasználóra meghatározott átlaggal számolva (3,56 mErlang) a következő:
 - Cellánként: $265 \text{ előfizető} \times 3,56 \text{ mE} = 0,943 \text{ Erlang}$;
 - Bázisállomásként: $793 \text{ előfizető} \times 3,56 \text{ mE} = 2,82 \text{ Erlang}$.

A fenti számításokat úgy méreteztem, hogy az egy felhasználóra jutó forgalom a prognosztizált átlaghoz képest nagyobb legyen. Az egyes bázisállomások forgalma különböző, valamint az előfizetői szokások is teljesen eltérnek az adott lokációkban, tehát a fenti dimenziók dinamikája a valóságban folyamatosan változik.

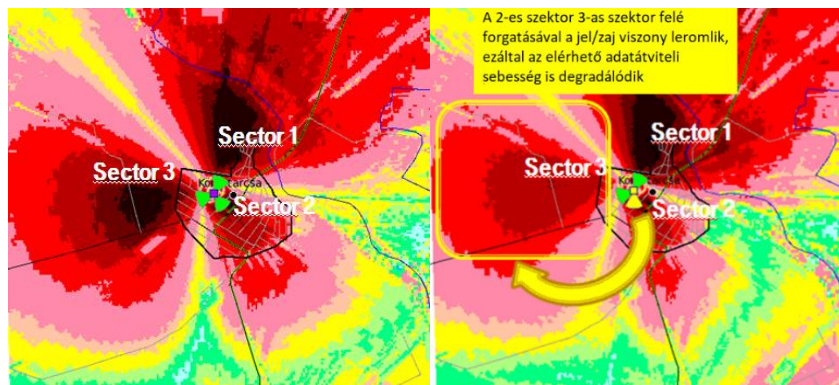
A szolgáltatók a kapacitásukat lakosságszámra méretezik, a következőkben a vészhelyzeti használatra vonatkozólag határozom meg az általam javasolt setup-ot, mely során a még elfogadható szintű Half Rate szintekkel is kalkuláltam. A lenti méretezés metodológia kizárólag a GSM hálózat meglétét veszi számba, maximum 4 TRX-es lehetséges cellakapacitással számolva. A vészhelyzeti GSM bázisállomásokra vonatkozólag tehát az alábbi kapacitástervezési megállapításokat teszem:

- 1500 fős lakosság vészhelyzeti kiszolgálására: 3x2 TRX szükséges;
- 1500 - 2500 fős lakosság vészhelyzeti kiszolgálására: 3x3 TRX szükséges;
- 2500 - 4000 fős lakosság vészhelyzeti kiszolgálására: 3x4 TRX szükséges;
- 4000 fős lakosság felett vészhelyzeti kiszolgálás érdekében szükség van további GSM layer indítására (GSM 1800) vagy további LTE frekvencia layer-ek integrálására (VoLTE).

3.3.2 Kapacitástervezési szempontok 4G hálózat esetén

LTE hálózat (4G) jelenleg Magyarországon a 700 MHz, 800 MHz-es, 900 MHz, 1800 MHz-es, valamint a 2600 MHz-es sávban működik [89]. Az LTE cellák – adott frekvenciasávban – interferálnak egymással, valamint a környező bázisállomásokkal is, melynek tükrében az elérhető adatátviteli sebesség maximalizálása érdekében az LTE cellák kiszolgálási területén törekedni kell a minél dominánsabb jelszintek kialakítására a cellák kiszolgálási területén belül, valamint cellák és site-ok közti zavartatás csökkentésére. A celladominancia növelése és az interferencia csökkentése a jel/zaj viszony javulását eredményezi, mely közvetlen hat az elérhető adatátviteli sebességre, ezért a bázisállomások celláit a mobil operátorok ezen stratégia mentén tervezik [90][91].

A 47. ábra a jel/zaj viszony fontosságát hivatott jellemezni, valamint a jel/zaj viszony leromlására bekövetkezett sebességcsökkenést.



47. ábra A bázisállomás három celláján belül elérhető adatátviteli sebesség (minél sötétebb a szín, annál nagyobb az elérhető sebesség) [Forrás: saját szerkesztés]

A 47. ábra a mobil bázisállomás 2-es szektorjának elforgatása történik a 3-as szektor felé. Mivel az LTE cellák azonos frekvenciavivőn üzemelnek, így ez interferencia emelkedéssel jár. Ez a folyamat degradálja a 2-es és 3-as cella kiszolgálási területén mérhető jel/zaj viszonyt, amely közvetlenül csökkenti a cellákban az elérhető adatátviteli sebességet [91], az átviteli sebesség pedig közvetett hatással van a kapacitásra. A cellakapacitás növelésére szolgáló megoldások lényegében megegyeznek a 2G celláknál említettekkel, kiegészítve annyival, hogy a 4G cellák a fent említett frekvenciasávok mindegyikén indíthatóak ellentétben a GSM által használt két sávval.

Az LTE cellák kapacitását tekintve teoretikus értelemben egy 5 MHz-es frekvenciablokk hozzávetőleg 200+ aktív mobil terminál átlagos forgalmát képes kiszolgálni egy időben [92], mely a valóságban sok egyéb aspektustól is függ.

A RRC mutató a kapcsolódások számát határozza meg, tehát hogy aktív módban hány terminál kíván forgalmazni vagy signaling (jelzés) üzeneteket váltani az adott cellán (mint például TAU vagy RRC Attach). Az RRC protokoll az LTE-Uu rádióinterfészen keresztül zajló jelzésváltási mechanizmus a mobil terminál és a bázisállomás (eNodeB) között és az alábbi funkciókkal rendelkezik.

- A rádióinterfész jellemzőivel kapcsolatos rendszerinformációk továbbítása;
- Az RRC-kapcsolat vezérlése, mely magában foglalja az SRB, a DRB, paging, a létesítés, a módosítás és megszüntetési fázist. Továbbá a vezérléshez tartozik a biztonsági funkciók aktiválása az LTE-Uu interfészen keresztül, amely a forgalom és az RRC jelátviteli folyamatok titkosítására és az RRC jelátviteli folyamatok integritásának ellenőrzésére szolgáló mechanizmusok létrehozását jelenti;
- Az handover-ek vezérlése. Ez az eljárás hajtja végre a cellaváltást két eNB között vagy a eNB és egy 2G/3G bázisállomása között;
- Mérések jelentése. Az eNB a mobil által végzett méréseket időszakosan vagy igény szerint indítja el [93].

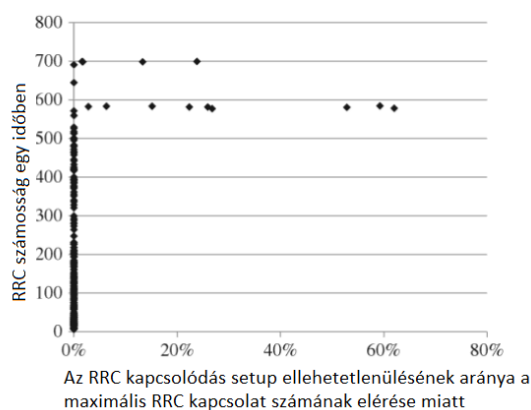
Az eNB szempontjából két működési állapot értelmezhető. Az egyik az üresjáratú/tétlen (RRC_IDLE), a másik pedig a csatlakoztatott üzemmód (RRC_CONNECTED). Tétlen üzemmódban a mobil nem kapcsolódik az eNB-re amíg az RRC kapcsolódási procedúra végbe nem megy. A kapcsolódási

folyamatot a terminál akkor kezdeményezni, amikor az forgalmi vagy jelzési adatokat kíván továbbítani, mely kapcsolódott üzemmódban már fogadhat és küldhet is [93]. Az LTE hálózat (pontosabban az MME) a TAU segítségével határozza meg, hogy az üresjáratú állapotban lévő terminál mely TA-ban tartózkodik, a TAU gondoskodik tehát helymeghatározási információk frissítéséről. A terminál a TA-k közötti mozgás során ún. TAU-kérelmet küld az MME felé, melyben értesíti az LTE-hálózatot (MME) az aktuális helyzetéről. Az attach folyamat során a terminál jelzi az RRC-kapcsolat létrehozásának igényét, az üzenet a kapcsolódási eljárás elindítására szolgál az attach (csatolás) üzenet elküldésével.

A kapacitás allokáció stratégiáját illetően beszélhetünk általános konfigurációról (mely a cellák generális működését reprezentálja maximalizálva az elérhető adatátviteli sebességet), valamint extrém felhasználószám kiszolgálására méretezett funkcióról. Előbbi esetben a hálózat megpróbálja az erőforrásokat úgy allokálni, hogy az aktív terminálok részére az elérhető adatátviteli sebesség mindig az igénybe vehető maximum felé közelítsen. Ez a kapacitás csökkenését eredményezi az egy időben kiszolgálható terminálok tekintetében.

Az adatátviteli sebesség maximalizálása az általános optimalizálói beállítás az LTE cellákon, mellyel egy 20 MHz-es cella megközelítőleg maximum 392 RRC aktív kapcsolatot tud egy időben kezelni, mely terhelés az elérhető adatátviteli sebességet aktív letöltési forgalom mellett akár 1 Mbps-re vagy az alá is csökkentheti [94].

Ha az aktív terminálok minél nagyobb számosságának ellátása kerül fókuszba, úgy az adatátviteli sebesség minimalizálásával a kapacitás maximalizálására van lehetőség optimalizálni. Hotspot-okban, nagy forgalmú helyeken (pl. fesztiválok vagy katasztrófa sújtotta területek) lehet ennek a beállítási lehetőségnek nagyobb relevanciája. Ezzel a konfigurációs módszerrel a kezelhető RRC kapcsolódások száma hozzávetőleg akár 800-ra is nőhet 20 MHz-es LTE vivőszélesség esetén (48. ábra) [94].



48. ábra Az RRC kapcsolódás setup ellehetetlenülésének aránya a maximális RRC kapcsolatok limit elérése miatt 20 MHz-es vivőn [94]

A 49. ábra szemlélteti, hogy az RRC kapcsolódások számának elutasítása miként növekedett meg a vizsgált esetekben 700 felett. Az eredmények eltérhetnek egyes vendor-ok hálózatában, de közelítéshez megfelelőek az adatok.

A 4G cellák kapacitásának meghatározása sok összetevőből áll össze, így ennek kérdését nem matematikai alapról szeretném megközelíteni, hanem az ügyfélélmény szempontjából, mely a vészhelyzeti felhasználók szemszögéből pragmatikus megoldásnak tűnik. Az LTE cellák minőségét befolyásoló paramétereket, amelyek reprezentálják az adott cella túlterheltségét és amelyekkel detektálhatók az esetleges torlódások lentebb ismertetem.

Az LTE technológiához igénybe vett spektrumot PRB-kre oszthatjuk. A RB-ok 12 subcarrier-ből (alvivő) állnak egyenként 15 KHz sávzélességgel, a RB így 180 KHz-et tesz ki, egy 20 MHz-es LTE sáv ennek tükrében 100 RB-t tartalmaz. A PRB kihasználtság mutató egyértelműen definiálja és reprezentálja az adott LTE cella kihasználtságát, így ez az egyik paraméter, amit szem előtt szükséges tartani, ha a cella terheltségét vizsgáljuk.

[A downlink PRB kihasználtság]

$$= \frac{\text{[a downlink irányú forgalmazásra rendelkezésre álló PRB párok száma]}}{\text{[a downlink irányú a rádiós hordozókhoz használt összes PRB száma]}} \quad (4)$$

Az ügyfélélmény szempontjából, illetve a kapacitás rendelkezésre állását illetően szintén releváns paraméter az adott vészhelyzeti esemény során tapasztalható letöltési adatátviteli sebesség.

[A downlink adatátviteli sebesség]

$$= \frac{\text{[az adat teljes átvitt mennyisége]} - \text{[az utolsó átviteli időintervallumban átvitt adat (kiürült puffer)]}}{\text{[tényleges DL átviteli idő]}} \quad (5)$$

A harmadik kapacitással relációban lévő paraméter az adott átviteli időintervallumban (TTI-ben) kiszolgált felhasználók száma, mely az alábbi összefüggéssel határozható meg.

[Az adott TTI – ben (DL) lévő felhasználók száma]

$$= \frac{\text{[az elküldendő adatokkal rendelkező felhasználók száma + átvinni kívánt adatok a pufferben]}}{\text{[azon ms – ok száma, amelyeken belül az adatok átvitele beütemezésre került (DL adat)]}} \quad (6)$$

- A TTI meghatározza, hogy az adott LTE spektrum és kapacitás, pl. 20 MHz-es cella esetén 100 Resource Block-ból az adott felhasználónak mennyit allokál a rendszer adott ms-ban. A rendelkezésre álló RB-okból mindig annyit oszt ki a rendszer, amennyit a forgalom éppen indokol. Minél több user osztozik adott időintervallumban (ms) az erőforráson, annál alacsonyabb adatátviteli sebességhez fog hozzáférni.

A fenti 3 paraméter tekintetében jelentős degradáció mutatkozik pl. egy vészhelyzet adta jelentős forgalomnövekedés során. A vészhelyzeti esemény kapcsán az alábbi kritériumrendszer alapján határozom meg a kritikus szintet elérő LTE cellákat, azaz torlódónak minősítem, amennyiben:

- a downlink irányú PRB kihasználtság 90% fölé emelkedik;
- az átviteli időintervallumban (ms), több mint 3 user osztozik a teljes erőforráson;
- az átlagos elérhető downlink adatátviteli sebesség 4 Mbps alá csökken.

Amennyiben a fent említett három feltétel egyszerre teljesül, úgy a vészhelyzetben érintett LTE cella torlódik és nem képes kiszolgálni az bajba jutott felhasználókat. Ennek kezelésére központi oldalról a hálózati feature-ök alkalmazásán túl új frekvenciasávon történő kapacitáscella indításával lehetséges reagálni, mely egyrészt licenz, másrészt az esetek többségében új hardver vagy eszköz

implementálását igényli (pl. új RRU, BBU, antennacsere stb.). Kivétel ez alól, ha egy másik technológia bizonyos frekvenciasávját allokáljuk át az LTE számára (pl. UMTS 2100 MHz-et LTE 2100 MHz-re), mely esetekben megvalósítható lehet a frekvenciák újrallokálása és a 4G cellák központi oldalról való bekonfigurálása. A fizikai bővítés időigényes, így egy prompt vészhelyzeti eseményre való reakcióra nem nyújt optimális megoldást. Bizonyos esetekben a bővítés már nem lehetséges, amennyiben egy adott bázisállomásra már minden 4G frekvenciasáv (kapacitáscella) implementálásra került és elfogyott a bővítéshez szükséges spektrum. Egy vészhelyzeti eseményre gyors reakció szükséges, így a kapacitásbővítési folyamatokra nincsen elegendő idő. Az egyetlen releváns megoldásként az ad-hoc jelleggel felállított speciális guruló bázisállomások területi integrálása jöhet számításba, melynek telepítési ideje szintén időigényes, de kapacitás megerősítésére alkalmas eszköz. Az ad-hoz telepítésű mobil bázisállomás, melyet a legforgalmasabb terület középpontjába kiállítva több szektorral és frekvenciasávval integrálnak, a meglévő hálózat mellett további robusztus kapacitást képes kialakítani, biztosítani [95].

A következő fejezetben élőhálózati cellákat fogok vizsgálni a fent meghatározott eredményeket figyelembevéve. Az analízissel a vészhelyzeti események során is fellépő torlódási jelenségeket szeretném ismertetni, valamint a felmerülő problémákra megoldást találni.

A különböző LTE frekvenciák különböző lefedettséget és (spektrumszélességtől függő) kapacitást biztosítanak. A fentebb ismertetett kapacitás meghatározási metodológia mondhatni „relatív” és változtatható, de én a továbbiakban ezek mentén fogok haladni. Több LTE frekvencia megléte esetén Carrier Aggregation működtethető (a frekvenciasávok összefogásával az elérhető adatátviteli sebességek megsokszorozása érhető így el), a magasabb adatátviteli sebességgel pedig indirekt módon növeljük a cellák kapacitását is: minél nagyobb az elérhető adatátviteli sebesség, annál gyorsabban képes a felhasználó a forgalmazni kívánt adatot átvinni és annál kevesebb ideig fogja igénybe venni a cella erőforrásait. Az analízis során a CA lehetőségeit is számba vettem.

3.3.3 Vészhelyzeti kapacitásproblémák 2G hálózaton

A választott helyszín egy olyan nagyforgalmú hotspot-ra esett, ahol az átlagostól eltérő mértékű forgalomnövekedés volt tapasztalható egy vészhelyzethez hasonló rendkívüli eseményből adódóan. Az esemény kialakulásának hirtelensége miatt az eseményt kiszolgáló cellák nem rendelkeztek a rendezvényeknél használatos nagy felhasználószámra méretezett erőforrásokkal. Rendezvényes konfiguráció alatt azt értem, amikor egy kisebb területre koncentrálna, előre megszervezett formában (a guruló vészhelyzeti állomásokhoz hasonlóan) egy kisvárosnyi/városnyi forgalmat kezelni képes bázisállomás konfigurációt integrálnak egy adott esemény forgalmának ellátásának érdekében. Ez $\frac{1}{4}$ km²-en is akár 6 site-ot, 6 LTE layert és a GSM-el együtt akár 60 - 70 darab cellát is jelenthet egy nagy látogatószámú rendezvény esetén, ahol főként small (alacsony magasságból sugárzott) cellákkal látják el a normálistól eltérő extrém forgalmat, továbbá ilyen felhasználás esetén a cellák beállításai a user szám minél nagyobb arányú kiszolgálására vannak hangolva, szemben az adatátviteli sebesség

maximalizálásával (ez az általános alapbeállítása a mobil celláknak). Ehhez képest egy ekkora területre városi környezetben 2-3 bázisállomást telepítenek a nagy beépítettség (épületcsillapítás) és magas forgalom ellátására, vidéki környezetben ez a szám néhány kilométerenként 1-re csökken. Érezhető a konverzió annak tükrében, hogy egy vészhelyzet milyen mértékű kapacitás gondokat okozhat, ahol ezek a konfigurációk nem kerülnek installációra. A mérési konfigurációt a **12. Melléklet** tartalmazza, mind a GSM, mind pedig az LTE layer-ek a valóságban is helytálló módon kerültek beállításra kezdve az alkalmazott antennától egészen a mechanikus és elektronikus dőlésekig.

A szektor kapacitása a következő:

- GSM 900 MHz; 2 TRX.

A vizsgált szektor celláinak vizsgálata élőhálózati adatokból került analízis alá, az év legforgalmasabb nagy felhasználói számú időpontja során (rendkívüli esemény). Ebben az időpontban a cellák kapacitásai kihajtásra kerültek, így kiváló kandidáltak bizonyul a vészhelyzeti események során tapasztalható kapacitások szimulációjához, valamint az abból tehető következtetéseknek. A bázisállomás 1-es szektora, tehát a vizsgált cellák által kiszolgált területét szoftverrel szimuláltam, ez a **13. Melléklet**ben látható.

Ebben a fejezetben üzemelő cellákat vizsgálok, melynek tükrében a vett jelszintet mérések formájában vizualizálok, kültérben alkalmazott mérőműszer segítségével, a GSM cella mérését egy Google térképre képeztem át (49. ábra).



49. ábra GSM 900 jelszintmérés eredménye [Forrás: mérési eredmény]

A mérésből következtethető, hogy a cella kiszolgálási területén jó kültéri jelszint tapasztalható a GSM 900-as cella tekintetében is, így a lentiekben a lefedettségéből adódó minőségi problémákat kizárhatjuk a hálózatok elemzése során⁸.

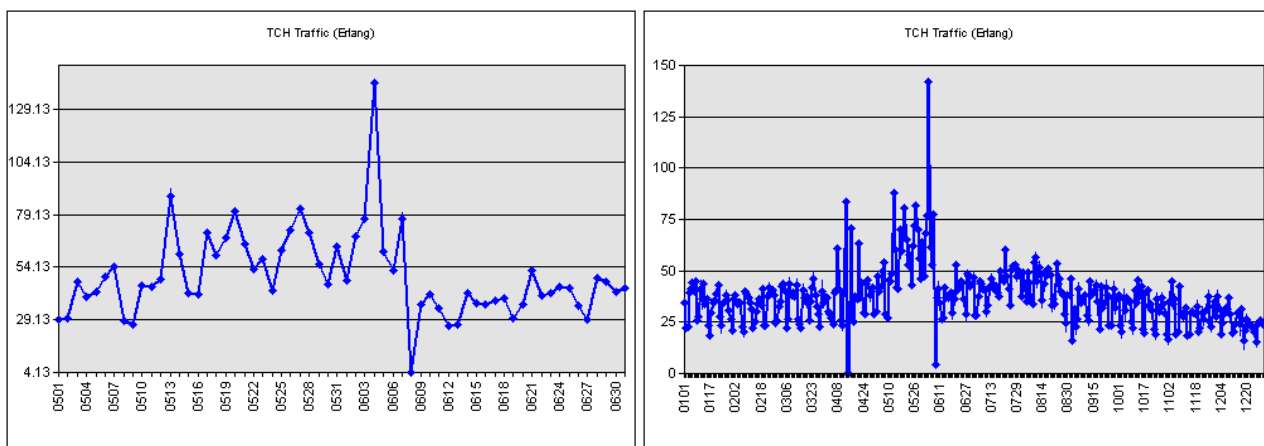
A GSM cella forgalmi analizéséhez minimum kapacitással rendelkező cellát választottam (2 TRX) annak érdekében, hogy rávilágíthassak arra, hogy egy esetleges vészhelyzetben – egy átlagban kis forgalmat kezelő cella – szolgáltatás minősége miként változik meg a forgalom drasztikus emelkedésével.

⁸ Az ellenőrző mérés utólagosan történt, nem a vizsgálat időpontjában

Első körben azt ellenőriztem, hogy volt-e bármilyen kiesés a vizsgált cellán, melyet azonnal kizártam (**14. Melléklet**).

A Timing Advance mutatót vizsgálva megállapítható (**15. Melléklet**), hogy a forgalom nagyobb része a bázisállomáshoz képest 1 - 2 km-en belülről érkezik, tehát a cellát érintő extrém forgalomművekedés ezen intervallumon belülről volt detektálható.

Az vizsgált év legforgalmasabb napja a TCH forgalmi KPI alapján 06.04-re esett (50. ábra és 51. ábra). A választott 2 TRX-es GSM cella ezen a forgalmas napon 141,71 Erlang forgalmat kezelt, mely hatalmas forgalomnak számít egy 2 TRX-es cella napi forgalmához és kapacitásához mérten [96].

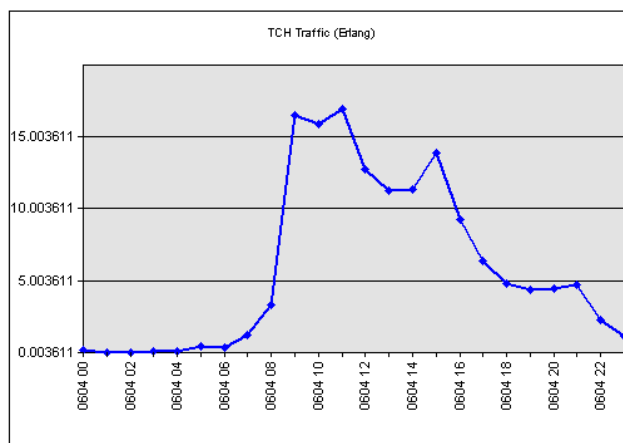


50. ábra TCH Traffic (Erlang) – 2 hónapos zoom (bal oldalt) [Forrás: mérési eredmény]

51. ábra TCH Traffic (Erlang) – éves statisztika (jobb oldalt) [Forrás: mérési eredmény]

Az éves napi átlag forgalom 37,02 Erlang volt, a 0 E körüli két peak minimum üzemhibából adódik, a peak maximumokat illetően pedig 10+ olyan nap látható, amelyen az átlagtól magasabb forgalom volt tapasztalható. Az általam elemezni kívánt 141,71 Erlang-os napi forgalom volt a legmagasabb, így ezt fogom analízis alá venni.

A fent említett forgalmas nap alakulását az alábbiakban vizsgálom. Az előző fejezetben már vázoltam, hogy egy 2 TRX-es cella Full Rate és 2%-os GOS mellett kb. 6,61 Erlang forgalmat képes kezelni egy időben.



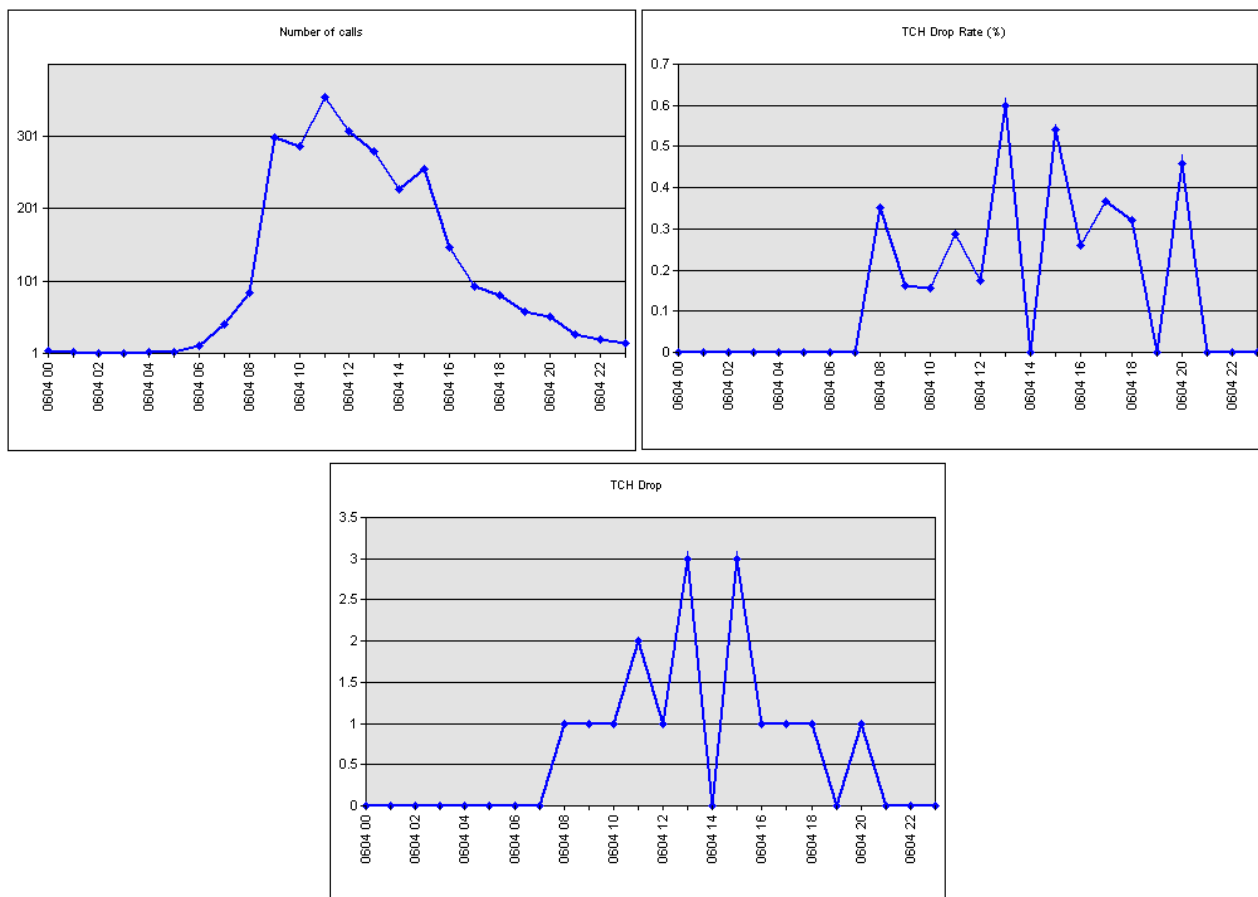
52. ábra TCH Traffic (Erlang) – a vizsgált forgalmas nap [Forrás: mérési eredmény]

A 52. ábra szerint 08:00 után látszódik, hogy a busy hours periódus megkezdődik és a forgalom drasztikusan nőni kezd a 16,92 Erlang-os maximális peak-ig. A korábban meghatározott 6,61 Erlang-os maximum az input adatok változtatásával (felhasználói szokások eltérése miatt) nőhet vagy csökkenhet, de ezt a forgalmi értéket vettem kiinduló alapnak. A hangminőség drasztikus csökkentésével, Full Rate-ről Half Rate-re a rendelkezésre álló időrések tovább feleződnek, így dupla annyi hanghívás kezelhető. Ennek tükrében HR-el a kb. 12 Erlang-os forgalom még kezelhető volna, ellenben ezt a limitet a vizsgált cella jelentősen túllépi, így torlódás alakulhat ki.

A fenti forgalomból (11:00 - 12:00) 3,21 Erlang AMR Full Rate (Adaptive Multi-Rate), 12,6 Erlang AMR Half Rate, 0,299 Erlang Full Rate (12 kbit/s max) és 0,74 Erlang Enhanced Full Rate beszédkodekek használatával zajlott a rádiós erőforrások függvényében. Ez azt jelenti, hogy a legforgalmasabb órában a forgalom kb. 75%-a zajlott Half Rate mellett. AMR-WB kodek nem volt aktiválva a vizsgált időpontjában. A teljes napot tekintve (éjszakai és reggeli nyugodt órák átlagát is egybevetve) 63% Full Rate és 37% Half Rate mellett zajlottak a hívások. A fenti eredményeket bemutató mutatók a **16. Melléklet**ben találhatóak.

A torlódások a fenti előzetes számítások szerint alakultak, a forgalmi kapcsolat felvételének sikerességi aránya (TCH Establish Success Rate) a forgalom kritikus emelkedésével egyenesen arányosan drasztikusan csökkenni kezdett 60%, majd 50% közelébe esett, de 30% környékén is mozgott. A 11:00 - 12:00 közt lévő legforgalmasabb órában az 1909 próbálkozásból (TCH Attempt) 697 alkalommal a felhasználók sikeresen foglaltak erőforrást (TCH Seizure), 1212 próbálkozás bizonyult sikertelennek (TCH Allocation Failure). A kapcsolat felvételének sikerességi aránya (TCH Establish Success Rate) ekkor érte el a minimális 36,51%-ot, illetve a forgalmi csatornakiosztási arány (TCH Allocation Failure Rate) a 63,49%-ot, ami azt jelenti, hogy kb. minden 3. próbálkozás volt sikeres. Ez a teljes napot nézve 11414 próbálkozásból (TCH Attempt) 6268 alkalommal zajlott sikeresen a forgalmi csatornák erőforrásainak igénybevétele (TCH Seizure), 5171 próbálkozás pedig sikertelennek bizonyult (TCH Allocation Failure), összesítve tehát 54% zajlott le sikeresen és 46% sikertelenül. Az eredményül kapott KPI-k vizuális eredményei a **17. Melléklet**ben található.

A fent említett 697 forgalmi csatornára irányuló sikeres kérelemből a 11:00 - 12:00 közötti legforgalmasabb órában 354 irányult hanghívás kezdeményezése felé, ami sikeresen le is zajlott. A többi próbálkozás adatkapcsolat, egyéb forgalmazásra (vagy a hívásfelépülést követő megszakításra) irányuló kérelmet jelentett vagy blokkolt hívást. A már a hálózatra csatlakozott user-ek megfelelően tudták végződtetni hívásaikat, összesen 2 drop call volt tapasztalható a legforgalmasabb órában (16 db a teljes napot tekintve, ami 0,25% -ot napi átlagarányt jelent). A fentieket a 53. ábra szemlélteti.



53. ábra TCH drop-ok statisztikái (fent bal oldalt a hívások száma, fent jobb oldalt a hívások eldobásának aránya, lent pedig az eldobott hívások száma) [Forrás: mérési eredmény]

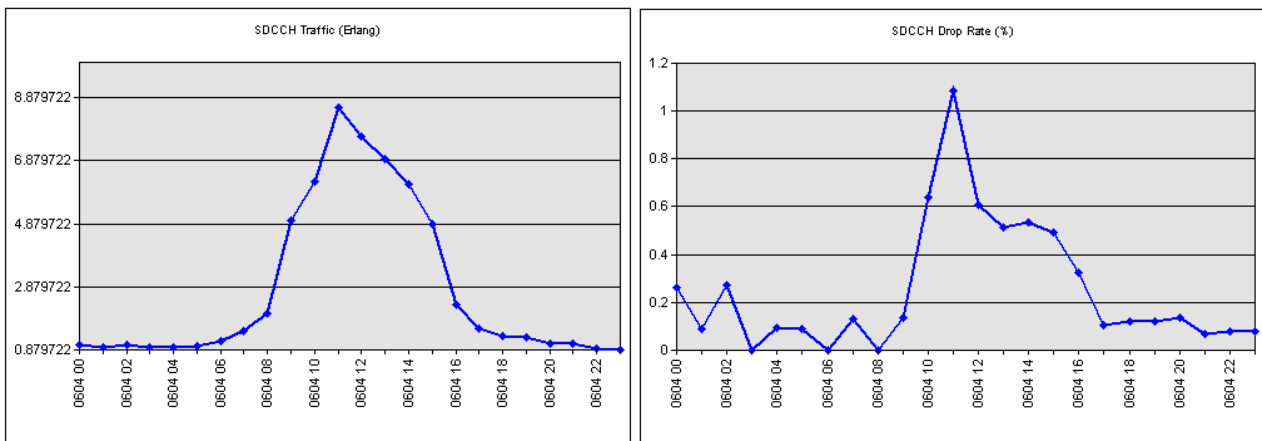
A blokkolt hívások száma a legforgalmasabb órában 77 volt, ami tartósan még a következő 4-5 órában is fennállt, a maximum blokkolt hívások száma 85 db volt, a teljes napot összesítve pedig 409 darab. A teljes nap átlagát nézve a Full Rate hívások torlódásai összesen több, mint 1200 mp-et tettek ki, míg a Half Rate hívások 14000 mp-et. Ezek mind az extrém forgalom (busy hours-ban) történtek, mely során 2657 sikeres hívás mellett 409 darab blokkolt hívás és 4,2 órányi forgalom torlódás alakult ki. A magas forgalom nagyszámú TCH-blokkolást eredményez, ami nagyban befolyásolja az előfizetői elégedettséget, mely vész helyzetben életébe kerülhet. A fenti mutatók a **18. Melléklet**ben láthatóak.

A handover-eket, azaz a cella területére érkező vagy az onnan távozó felhasználókat megvizsgálva az látszik, hogy hasonló léptékben érkeztek a cellába és távoztak onnan, ellenben az érkezési kb. 1,5x-ese a távozó grafikonjának, ami azt jelenti, hogy a cellának egyre nagyobb forgalommal kellett lekezelnie. A

fentebb vizsgált legforgalmasabb órában 11:00 - 12:00 343 bejövő handover próbálkozás történt, míg csak 151 kimenő. A handover statisztikákat a **19. Melléklet** tartalmazza.

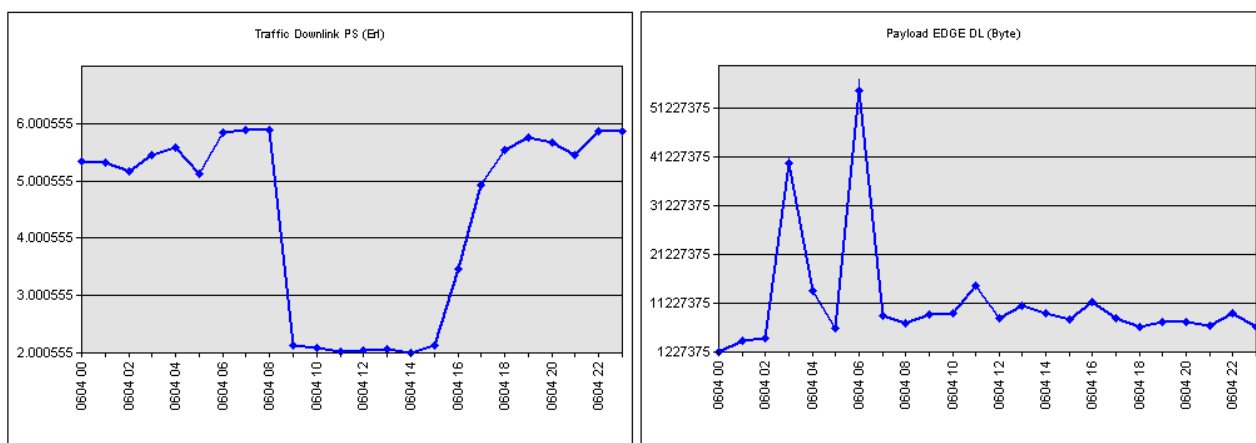
A grafikonokon az látszik, hogy ez imént említett bejövő és kimenő handoverek sikeressége 100% alatti volt, tehát a cella nem tudott minden bejövő próbálkozást sikeresen kezelni, 11:00 - 12:00 között a bejövő handover-ek sikerességi aránya 98%-ra, a kimenő pedig 96,8%-ra degradálódott. Az LTE VoLTE hívásokról való handover (SRVCC - Single Radio Voice Call Continuity) 97,72% körül alakult. A kimenő handover-ek sikertelensége arra enged következtetni, hogy a szomszédos cellák is jelentős terhelés alatt voltak. A bejövő, kimenő, valamint az SRVCC handover-ek sikerességi arányait a **20. Melléklet** tartalmazza.

Az SDCCH forgalmat vizsgálva (54. ábra) a jelzészváltások (és SMS-ek) a BCCH layer-en sikeresen lezajlottak, ebben a tekintetben kritikus problémát nem találtam. Az SDCCH forgalma is 11:00 - 12:00 között tetőzött, valamint 8,7 Erlang körül alakul, ekkor a Drop Rate aránya 1,1%-ra nőtt, mely a SDCCH igénybevételének kísérlete és sikerességének számossága is igazol. Az SDCCH-ra vonatkozó különböző statisztikák a **21. Melléklet**ben találhatóak (kapcsolódási kísérlet, sikeresen lezajlott, sikertelen, és eldobott próbálkozások száma).



54. ábra SDCCH forgalom statisztikái [Forrás: mérési eredmény]

A GPRS és EDGE forgalmat is vizsgáltam (55. ábra). Mivel a hangforgalom prioritást élvez a csomagkapcsolt forgalommal szemben, így a 2 hónapos időablakot vizsgálva a forgalom az eddigi legrosszabb mutatót produkálta. Továbbá az is megállapítható, hogy a torlódó időszakban mind az EDGE mind pedig a GPRS forgalom a reggeli órákat követően lényegében teljesen „beesett”, melynek oka, hogy az erőforrások a hanghívások számára allokálódtak.



55. ábra PS és EDGE forgalom [Forrás: mérési eredmény]

A fenti vizsgálat szerint a forgalmi csatornák igénybevételekor jelentős torlódás alakulhat ki miután a mobil terminál az SDDCH-t sikeres lefoglalta. Ez a torlódás a legforgalmasabb órában 64%-os, a teljes napi átlagot tekintve 46%-os sikertelenséget jelent a forgalmi csatornák igénybevételére vonatkozólag.

Összességében közel 500 hívás került blokkolásra és a torlódásra, mely kb. 4 órán keresztül tartott. Mindeközben a GPRS és EDGE adatforgalom teljességgel ellehetetlenült a hanghívások minél nagyobb arányban történő kiszolgálása érdekében. A fenti forgalom a felhasználói szokások vészhelyzetben való megváltozása miatt ennél rosszabb eredményeket is mutathatna, mely drasztikus következményekkel járna a vészhelyzeti kommunikáció tekintetében.

3.3.4 Kapacitászámítás network sharing⁹ esetén 2G hálózaton

A lentiekben azt a teoretikus esetet vizsgálom, amennyiben vészhelyzetben – azaz, ha ország bármely területén krízishelyzet kerülne elrendelésre a Katasztrófavédelem által – a területen elérhető szolgáltatók hálózatainak kapacitása aggregálásra és megosztásra kerülhetne. Ennek keretében a szolgáltatók az emelkedett generált forgalmat egymás hálózatai közt egyenletesen elosztva volnának képesek kezelni. Amennyiben három szolgáltatóval és minden szolgáltató részéről azonos GSM cellakapacitással számolok (2 TRX), akkor a három szolgáltató 3 szektora 2%-os GOS mellett az Erlang B tábla szerint kb. 27,37 Erlang forgalom kezelésére volna képes (3 x 2 TRX, amely 3 x 12 = 36 TCH csatornát jelent).

A nap legforgalmasabb órájában 16,92 Erlang teher volt a vizsgált hálózaton. Feltételezem, hogy a vizsgált hálózathoz tartozott a szimulált legnagyobb ügyfélszám, és a másik két operátor hálózatának forgalma 65% és 50% arányú¹⁰, tehát a busy hour-ben mért forgalmi peak-je a lentiek szerint alakulna:

Busy hour forgalom per operátor:

- Operátor 1: 16,92 Erlang (vizsgált szimulált operátor);

⁹ Kapacitás vagy lefedettség szempontból történő hálózatmegosztás

¹⁰ Ez a számítás a legforgalmasabb hálózathoz képest közelítésnek megfelel, pontos adat nem áll rendelkezésre, ugyanakkor GSM-en a tapasztalatok alapján átlagosan ez az arány megfelelő a legforgalmasabb szolgáltatóhoz képest számítandó forgalom (másik két szolgáltató) vonatkoztatásában. Továbbá a kapacitás szempontjából számításom „pesszimista” a kapacitás tekintetében, mert mindhárom szolgáltató részéről a minimális 2 TRX-es kapacitást feltételeztem

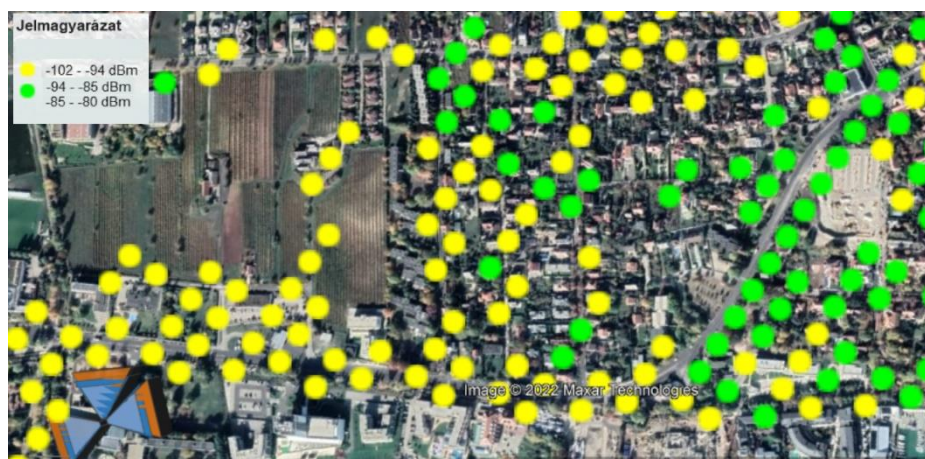
- Operátor 2: ~11 Erlang (65%-os load a szimulált legforgalmasabb operátorhoz képest a peak időpillanatában);
- Operátor 3: 8,46 Erlang (50%-os load a szimulált legforgalmasabb operátorhoz képest a peak időpillanatában).

Összesen tehát a három operátor ~36,4 Erlang forgalmat generálna a legnagyobb terheléssel járó órában, míg a három szolgáltató szektorának Full-Rate melletti kapacitása ~27,37 Erlang.

A fenti számítás szerint ~25%-os Half Rate mellett torlódás nélkül kezelhető lenne a peak forgalom, amennyiben a feltételezett három szolgáltató kapacitása aggregálásra kerülne. A példában ~75%-os Half Rate és jelentős torlódás mellett zajlott le a legforgalmasabb óra forgalmának alakulása, melyhez képes jelentős javulást eredményezne a feltételezett kapacitás network sharing lehetősége [97]. A fenti számítás számtalan más élőhálózati példával is alátámasztható volna, a kapacitás minden erőforrás aggregációjával való egyenletes elosztása segítségével szolgál a vészhelyzeti kommunikáció tekintetében.

3.3.5 Vészhelyzeti kapacitásproblémák 4G hálózaton

Ebben a fejezetrészen ugyanezt helyszínt és időszakot fogom vizsgálni a 4G hálózat szempontjából, ahol vészhelyzethez hasonló rendkívüli esemény zajlott. A vett jelszintek a LTE 800 MHz-es hálózat esetén lemérésre kerültek (kültérben), a mérési mintákat egy térképre vetítettem (56. ábra).



56. ábra LTE 800 RSRP mérés [Forrás: mérési eredmény]

A mérés célja az volt, hogy a lefedettségi és minőségi problémákat első ízben kizárjam, azaz, hogy bizonyítsam, hogy a vizsgált lefedő cella megfelelő lefedettséget nyújt az analízis alá vett területen¹¹.

Az LTE cellákat a következő frekvenciákon vizsgáltam:

- LTE 800 MHz; 10 MHz;
- LTE 1800 MHz; 20 MHz;
- LTE 2600 MHz; 20 MHz.

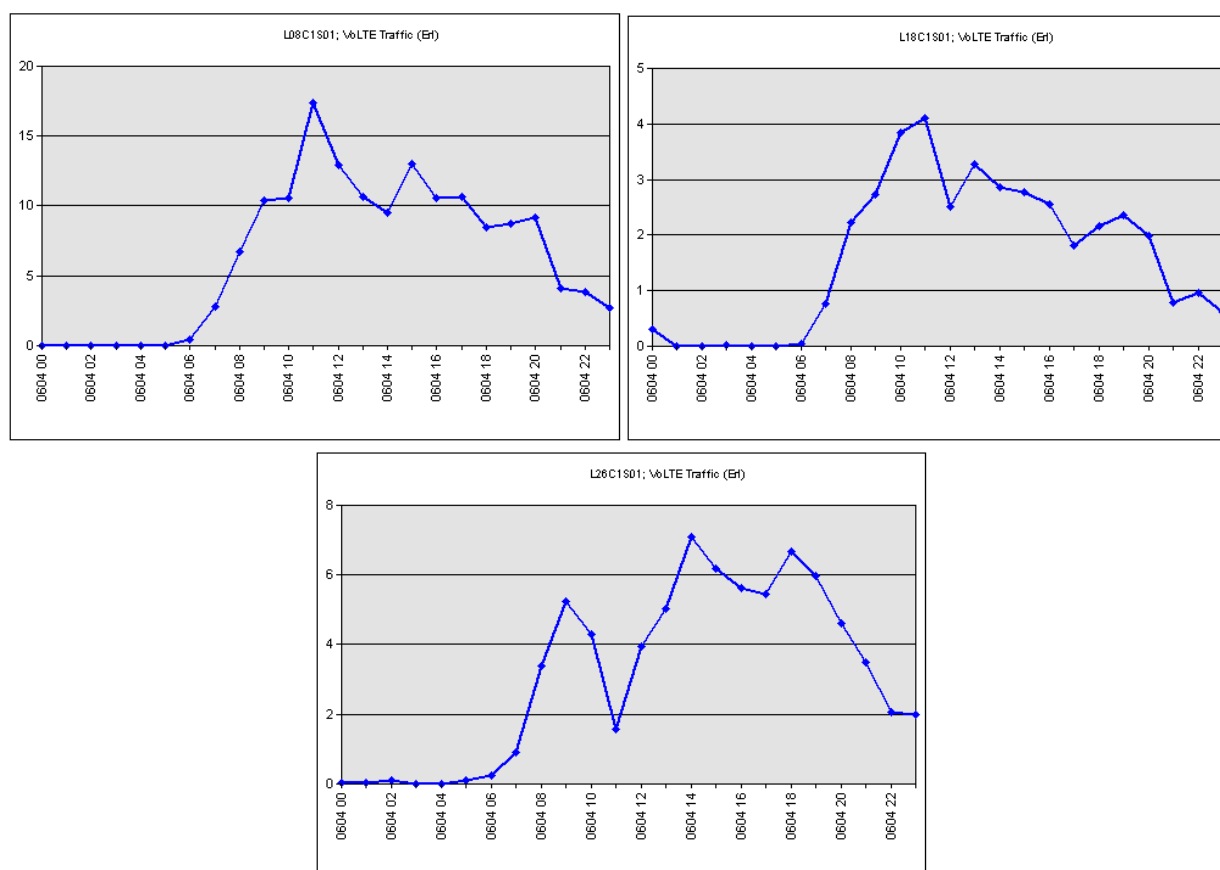
¹¹ Az ellenőrző mérés utólagosan történt, nem a vizsgálat időpontjában

Ez a konfiguráció korrelál azzal a kapacitással, amelyet a szolgáltatók országos átlagban jelenleg alkalmaznak Magyarországon (2-3 LTE réteg). Az országos modernizáció keretében a további LTE frekvenciasávok integrálása még hosszú folyamat, illetve a szolgáltatók egyéni üzleti megfontolásai alakítják, hogy hol és milyen időtávlatban történik fejlesztés.

Ennek tükrében az LTE 900 és 2100 MHz a jelenlegi konfigurációnak nem része, ellenben az LTE három frekvenciasávon történő üzemelése kapacitás szempontból optimális konfigurációnak tekinthető az országos átlaghoz hasonlítva.

Az LTE szektor celláinak (L800, L1800, L2600) vizsgálatát ugyanarra a forgalmas napra vetítve végeztem el, minden vizsgált mutató tekintetében analízis alá vettem a lefedő L800-as réteget, valamint az L1800-as, és a L2600-as kapacitáscellát. Az cellák iránya megegyezik, az antennák dőlése is közel azonosnak tekinthető, a mérési konfiguráció a **12. Melléklet**ben található.

Első körben a hangforgalmat vizsgálom, mely a GSM cellához hasonlóan 11:00 - 12:00 között csúcsosodott, valamint meghaladta a GSM által kezelt (16,92 Erlang) forgalmi értéket, az LTE 800-as cella 17,37 Erlang-ot kezelt a legforgalmasabb órában (illetve 152,76 Erlang-ot napi bontásban). A kisebb cellasugárral rendelkező L1800-as cella csúcsidőben 4,09 Erlang, napi összesítésben pedig 38,6 Erlang VoLTE forgalmat bonyolított (57. ábra). Az L2600-as szektor az alkalmazott frekvenciasáv tükrében csak a bázisállomás közvetlen közelében vesz fel forgalmat, ennek ellenére az L1800-nál több forgalmat kezelt a cella (14:00 - 15:00 között a legforgalmasabb órában 7,07 Erlang, napi összesítésben pedig 74,03 Erlang-ot).



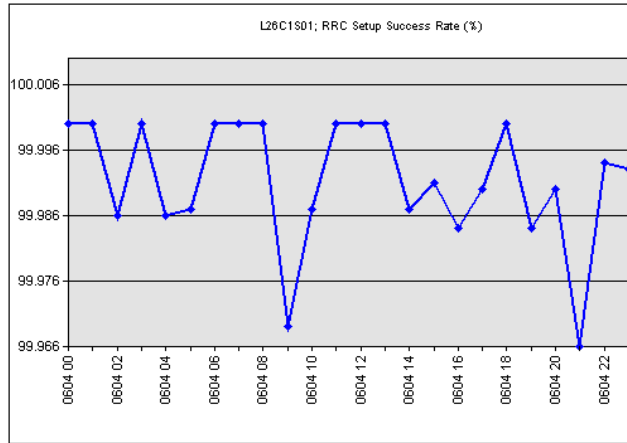
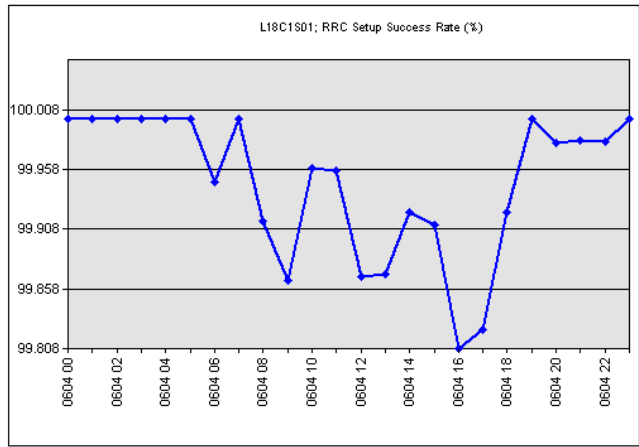
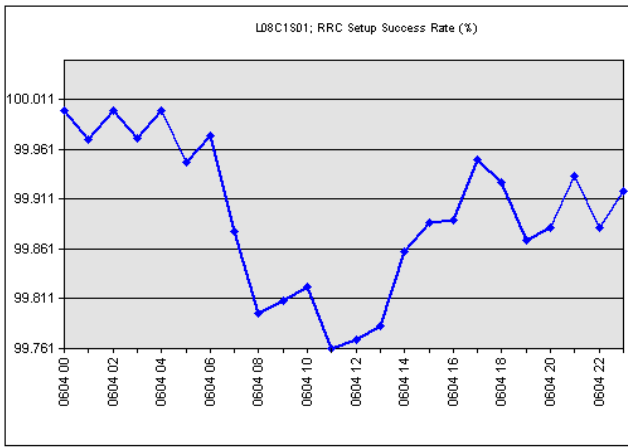
57. ábra VoLTE forgalom (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

Az L2600-as kapacitás réteg kétszer annyi forgalmat kezel, mint az L1800-as cella. Hálózatoptimalizálói megfontolásból a magasabb frekvenciák általában prioritást élveznek az alacsonyabb LTE frekvenciákkal szemben, mivel a kiszolgálási területük kisebb, így főként a bázisállomás közeléből képesek a forgalmat felvenni [98].

Az L1800-as cella jóval kevesebb forgalmat kezel, melyből következik, hogy a terhelés nagyobb része a bázisállomás közeléből érkezik (az L2600 által kezelt forgalom). Ezt a Timing Advance vizsgálatával lehet igazolni. Az L800-as cella forgalmának 80-90%-a 1 km-en belülről érkezett, majd a legforgalmasabb órát elérve (11:00 - 12:00) a load – hálózatoptimalizálói indokok miatt – a kapacitáscellákra terelődött át, így az L800-as cella nagyobb arányban kezdett távolabbról forgalmat felvenni. Ezt megerősítve megállapítható, hogy az L18-as és L26-os cella forgalma megnövekedett 1 km-en belülről, az L18-as cella mérsékelten csökkenve vett fel távolabbról forgalmat, az L26 pedig jelentősen kevesebbet. A TA KPI-k statisztikái a **22. Melléklet**ben található.

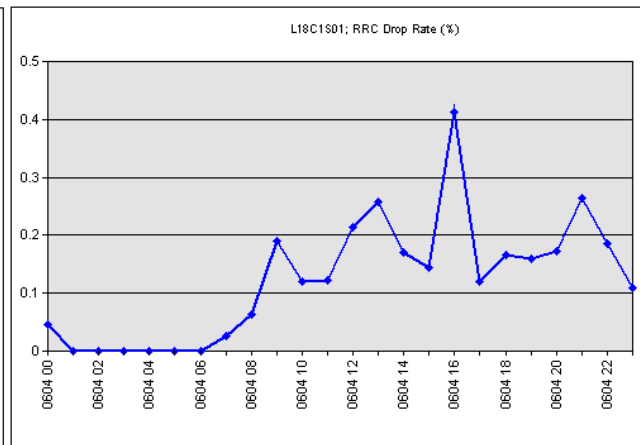
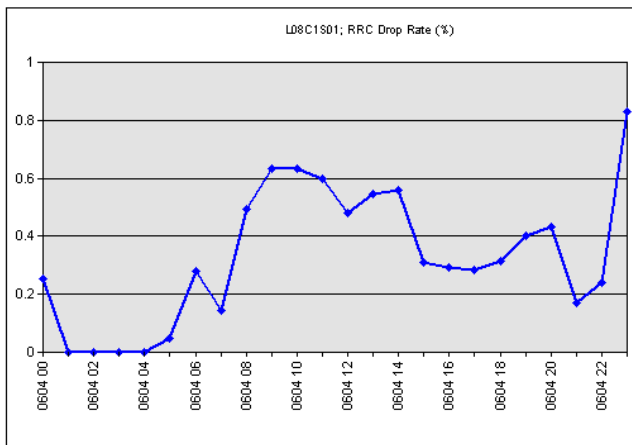
Az LTE 800-as sávon a 2190-ból VoLTE hívásból 6 megszakadás történt, L1800-on 1549-ből 3, az L2600-on pedig 3828 hívás zajlott le, amiből összesen 1 eldobás történt. Ez nem számít magasnak egy torlódás esetén, továbbá elképzelhető, hogy a megszakadások egy része valamilyen minőségi vagy jelszint degradációból adódott. Megjegyezendő, hogy a hangforgalom prioritást élvez az adatforgalommal szemben az LTE hálózaton, így az adatforgalmi mutatókban nagyobb degradációt prognosztizálható ennél a pontnál. A fentiekre vonatkozó statisztikákat a **23. Melléklet**ben csatoltam.

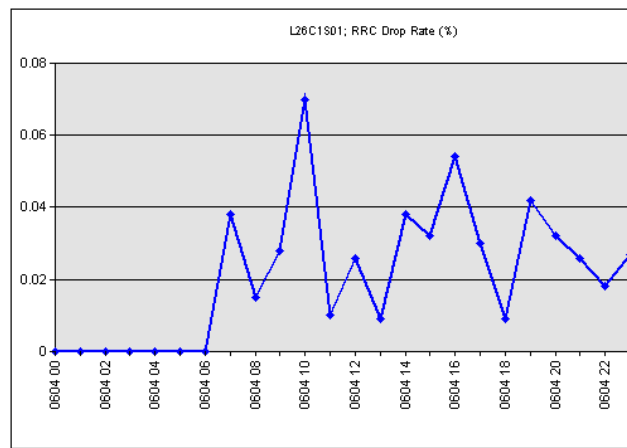
Az RRC kapcsolódások sikerességének aránya az egyik olyan beszédes mutató, ami jó közelítést ad egy LTE cella kapacitásának kurrens állapotáról és a forgalom alakulásáról. A lenti grafikonokon (58. ábra) az látszik, hogy a GSM hálózat forgalom emelkedését megelőzően (08:00) már 06:00-tól elkezdődik a terhelésnövekedés az L800-as sávon, valamint a kapacitásproblémák is megjelennek az RRC kapcsolatfelépítési sikerességi arány csökkenésével. Bár a forgalmas órák alatt végig 99,7% felett alakul ez a mutató, de 11:00-12:00 között 99,76%-ig esik és egészen az esti órákig az átlagostól alacsonyabb értéken mozog. Az L18-as kapacitáscella az RRC kapcsolódások sikerességi arány tekintetében csak később a 07:00 - 8:00 között kezd el csökkenni, a minimum peak 99,8% felett marad, a forgalom hatására tehát ingadozóan változik ez a mutató. Az L26-os réteg pedig szintén 8:00 után kezd becsúszni minimálisan 99,97%-ra, ezen felül az esti órákban tér vissza ilyen tartományban, ekkor veszi fel a minimum peak-et feltételezhetően újabb forgalom megugrás miatt.



58. ábra RRC setup sikerességi arány (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

Az RRC drop-ok görbéi (59. ábra) hasonló alakzatot vesznek fel, alapvetően az L800-on tapasztalható a legtöbb olyan kapcsolódás (napi átlag 0,411%), amelyet nem tudott teljesíteni a hálózat (pl. adatkapcsolat felvétel, ami sikertelenül zajlik), az L18-on jóval kisebb arányú eldobás volt tapasztalható (napi átlag 0,163%), az L26-os kapacitás rétegen pedig elhanyagolható (napi átlag 0,026%).

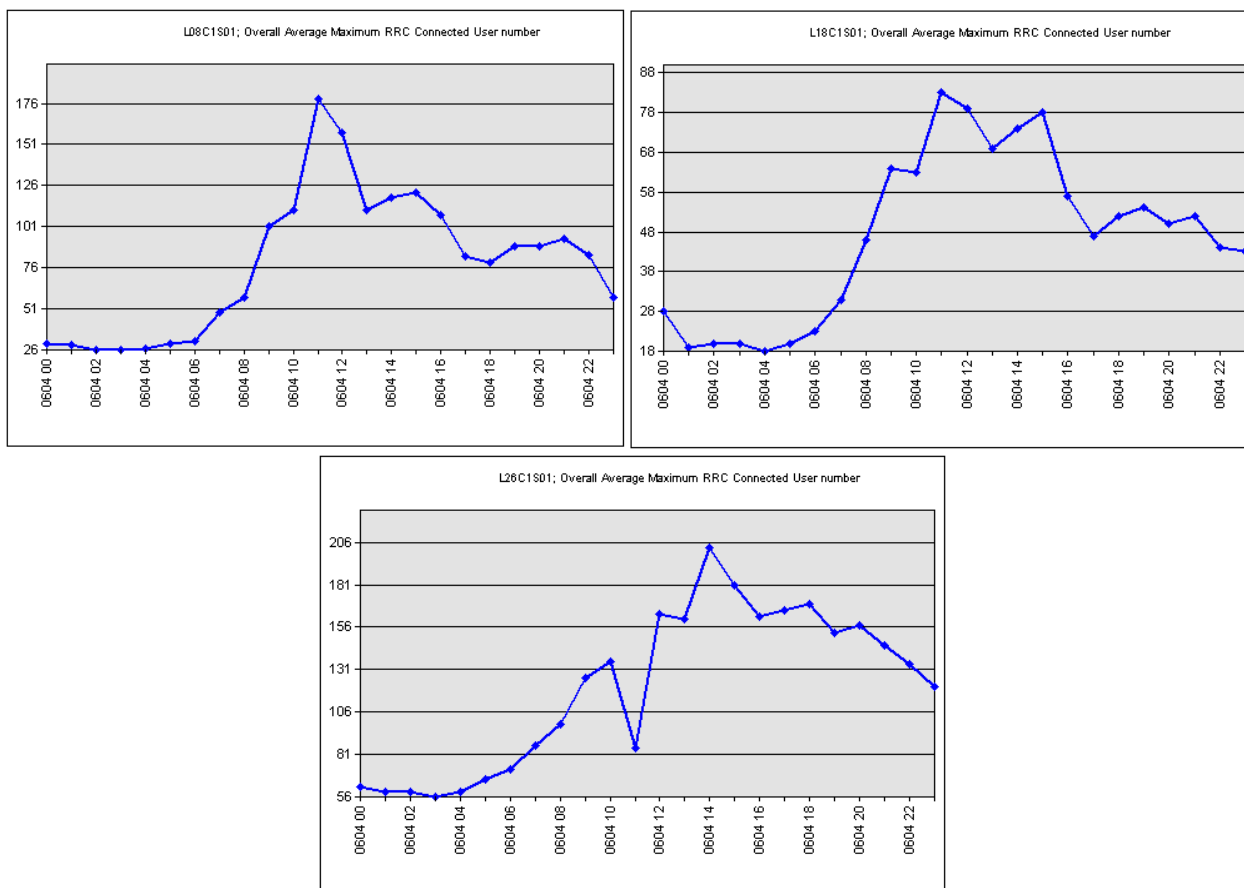




59. ábra RRC drop arány (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

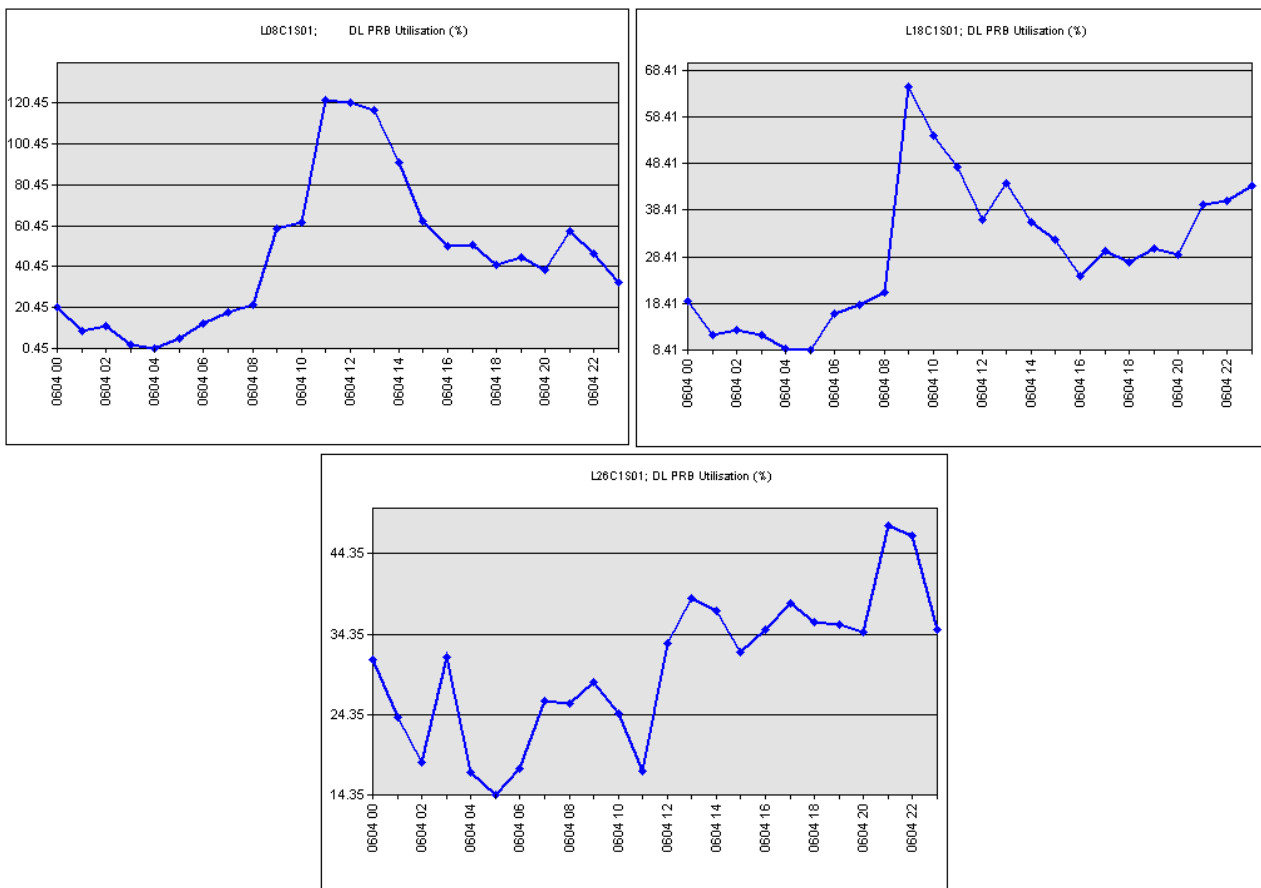
A következőkben a drop arányának dimenzióit vizsgálom, az RRC kapcsolódási száma, valamint ezek sikerességének és sikertelenségének (drop) pontos statisztikáit. A drop-ok száma releváns mutató lehet egy vészhelyzeti esemény szempontjából, hiszen ezek a felhasználók nem képesek a vészhelyzeti esemény során adatkapcsolatot indítani az adott időpillanatban. Az L800-as hálózaton a nap átlagában 60346 kapcsolódásból 953, az L18-on 46480-ból 250, az L26-on 149985 kapcsolódásból összesen 98 elutasítás történt. Ezek a kapcsolódási kísérletek az adatkapcsolatra vonatkozó, illetve a signaling üzenetek továbbításra irányuló kérélmeket is magába foglalták. A fenti statisztikák a **24. Melléklet**ben találhatóak.

A maximális RRC konnekciónak száma az L800 és a L2600-as layer tekintetében voltak a hangsúlyosabbak a már fentebb említett hálózatoptimalizálói indokok miatt (UE prioritás: első L26, második L18, harmadik L08), melyből adódóan a bázisállomás közelében az L2600-as réteg a kiszolgáló cella, amennyiben az L26 cellahatáraihoz érünk az L1800 veszi át a forgalmat. Az L1800 és L2600 -os cellaméreték – a frekvenciából adódóan – közelebb állnak egymáshoz, mint az L800 és L1800. Mivel a bázisállomás közelében az L26 élvez prioritást, annak cellahatárain kívül az L18 azt a szeletet képes szolgálni, ami a L2600-os cella határán kívülre esik, de még az L1800 cella határain belülre, tehát az L1800 forgalma reálisan bizonyult a legkevesebbnek. Ezen a területen kívül már csak az L800-as cella képes szolgáltatást biztosítani. Az RRC kapcsolódások száma (60. ábra) és a PRB kihasználtság mutatók jó képet adnak a kapacitási load státuszáról.



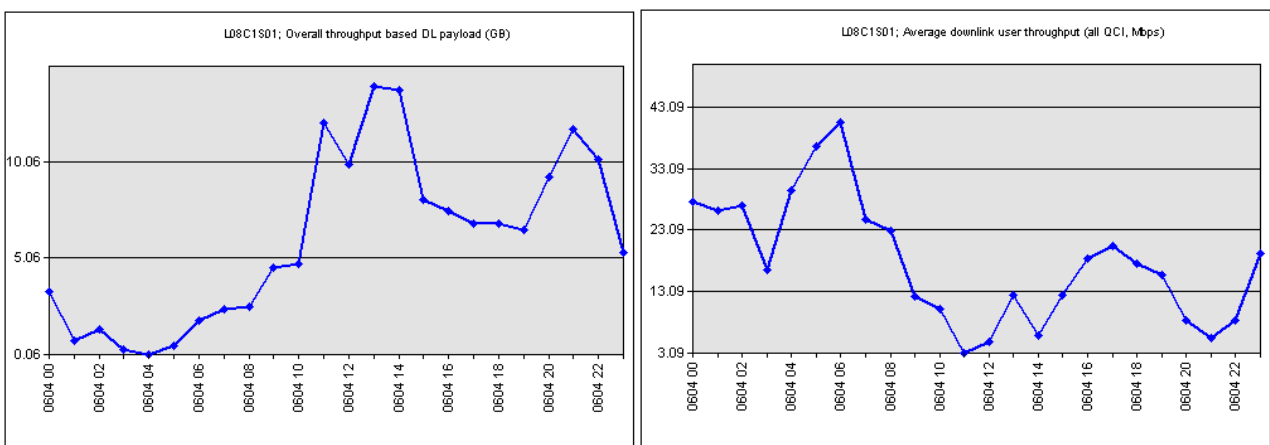
60. ábra Átlagos maximális RRC csatlakozások száma (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

A downlink PRB utilization, azaz a cellakihasználtság is alátámasztja a fentieket, miszerint az L800-as cella a kapacitása teljes erőforrását igénybe veszi, sőt meg is haladja azt, míg az L1800 maximális peak-je 67,5%-ig emelkedett, a L2600 kapacitásában pedig bőven maradt még erőforrás, a csúcspont 39,5%-nál volt. Az L1800 az elérhető resource block-jainak kb. 82%-át használta ki busy hours-ben, a napközbeni forgalom növekedést vizsgálva. Kijelenthető tehát, hogy a 10 MHz-es L800-as layer teljesen elérte kapacitásának határait, mely a 3.3.2 fejezetben tárgyalt kapacitásbővítési kritériumokat jóval meghaladja (PRB 90%), illetve ezt az értéket busy hours-ben vizsgálva az L18-as kapacitás réteg is átlépi. Az uplink PRB hasonló görbét mutat minden frekvencián., L800-on eléri a cella kapacitásának határát, L1800-on és L2600-on pedig a kb. 45%-os load-nál mozog a legforgalmasabb órában (11:00 - 12:00). A downlink PRB KPI-ket a 61. ábra mutatja be, az uplink PRB pedig a **25. Mellékletben** látható [99].



61. ábra Downlink (1.-3. ábra) PRB kihasználtság (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

A forgalomnövekedéssel egyenesen arányosan megnőtt a letöltött adat mennyisége, ugyanakkor az elérhető átlagos throughput (THP) ezzel fordítottan arányosan csökkent. Mindhárom frekvenciasáv esetén hasonló eredményre (görbére) jutottam, így a lentiekben csak az L800 letöltött adatmennyiségét (payload) és throughput-ját ábrázoltam (62. ábra). Az L1800 és a L2600 ezen paramétereit a **26. Melléklet**ben csatoltam.

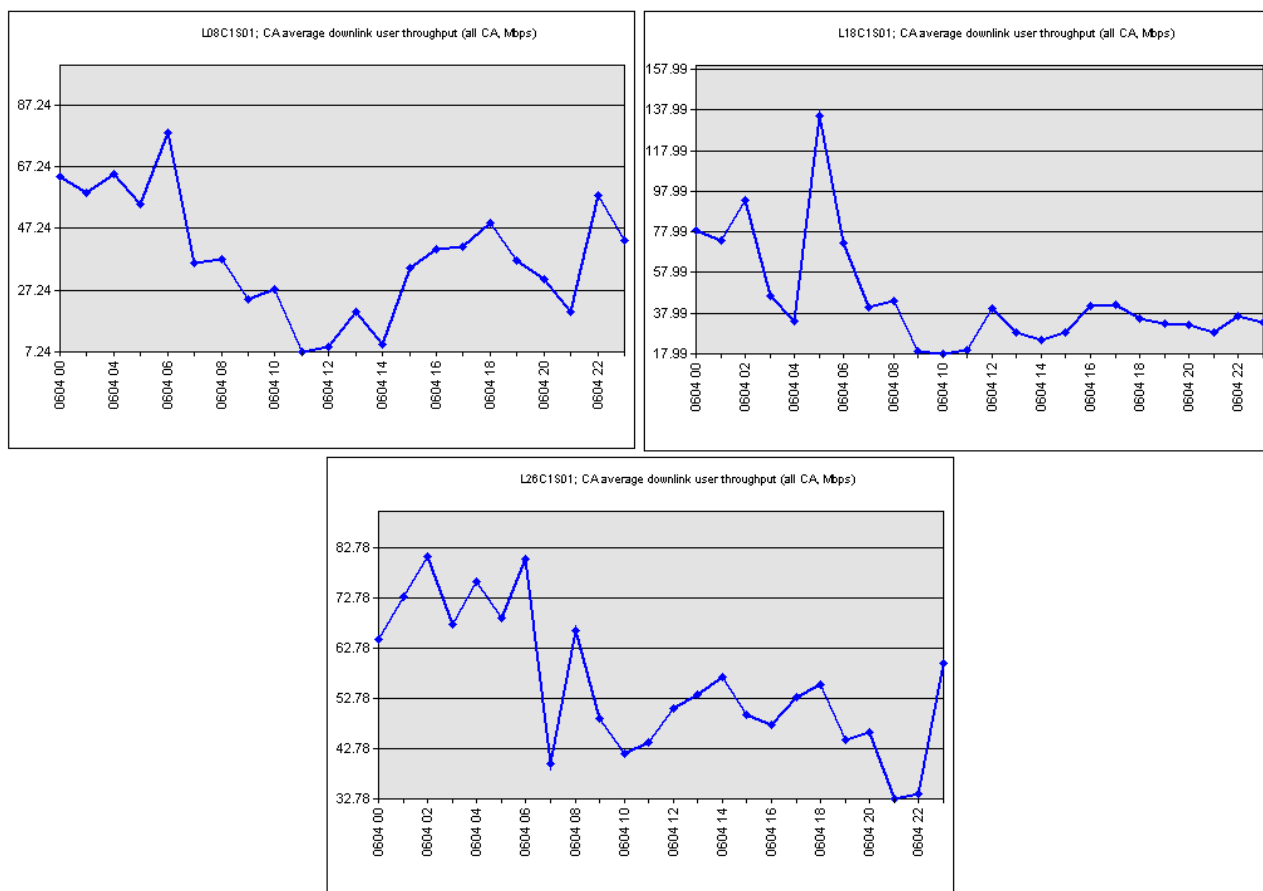


62. ábra Letöltési mennyiség és az elérhető adatátviteli sebesség (L800) [Forrás: mérési eredmény]

Az L800-as lefedő frekvenciasáv elérte a kritikus 4 Mbps alatti kapacitásbővítési kritériumértéket (3,09 Mbps-os minimummal). Az adatátviteli sebesség beesését illetően is a 11:00 - 12:00 közötti időszak bizonyult a legforgalmasabb időszaknak (legalacsonyabb átlagos letöltési sebesség), amely mellett a

torlódó cellában tartózkodó felhasználók nem volnának képesek megbízhatóan forgalmazni egy vészhelyzeti szituációban. A vészhelyzettel kapcsolatos adatkommunikációra (videóletöltés és csere, videóhívás indítása tudósítás vagy mentési lépések meghatározására) ilyen adatviteli sebesség mellett nincs lehetőség. A kapacitáscellák által biztosított letöltési sebességek minimuma 15.43 Mbps az L1800 tekintetében és a 24,61 Mbps az L2600-on mért átlagos adatátviteli sebesség a napközbeni torlódással érintett időszakot vizsgálva (a későesti peak-et nem vettem figyelembe). A napi átlagos letöltési sebesség az L800 vonatkozásában 8,14 Mbps, az L1800-as sávon 22,75 Mbps, az L2600 frekvenciasávon pedig 37,9 Mbps [55].

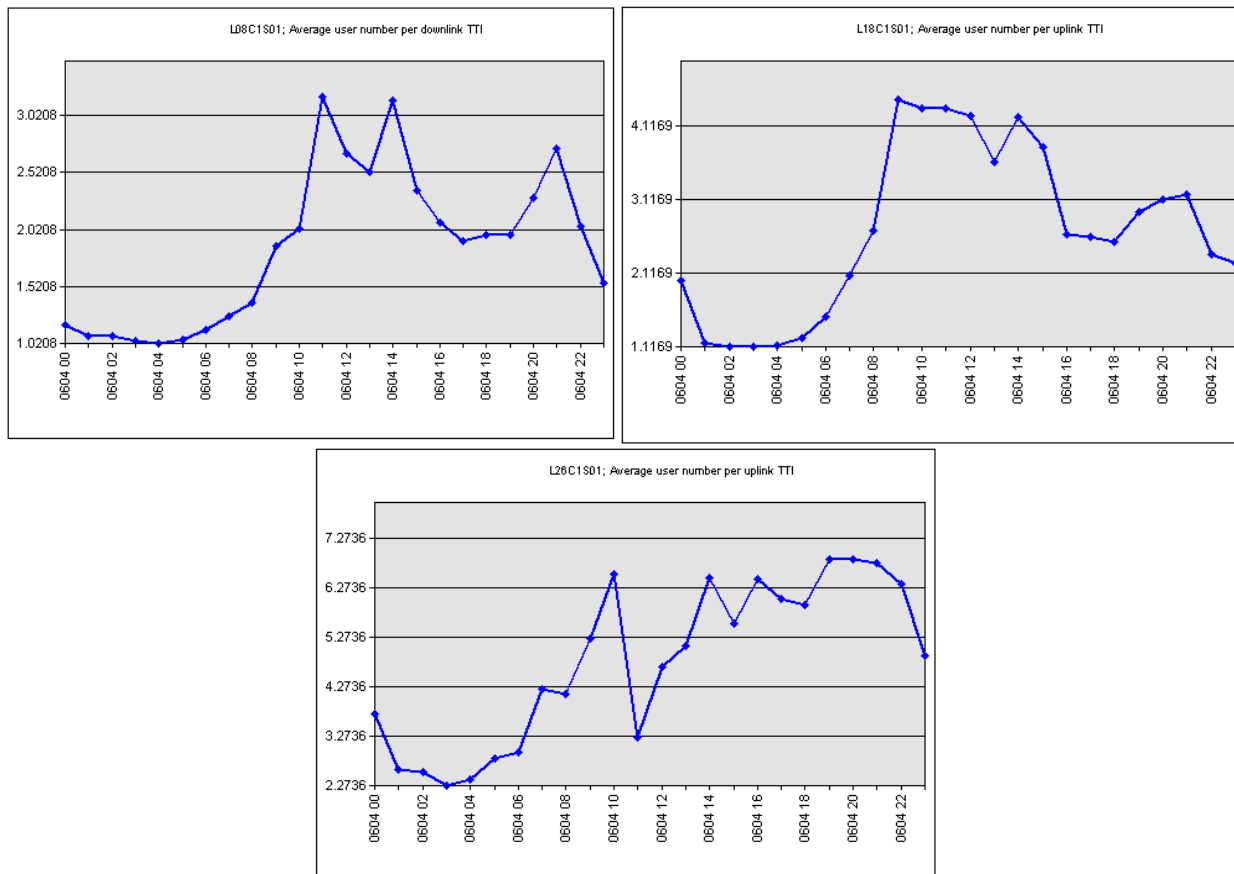
A fenti frekvenciák összefogásával, Carrier Aggregation-re (vivő egyesítésre) van lehetőség ott, ahol a terminál támogatottság és rádiós körülmények ezt megengedik, valamint a CA-ban részt vevő LTE sávok megfelelő jelszinttel és RSRQ-val elérhetőek. A Carrier Aggregation-el is forgalmazott terminálok az alábbi átlagos statisztikákat generálták (63. ábra). A diagram igazodik az előzőekben vázolt görbékhez, ellenben az elérhető letöltési sebesség a CA-nak köszönhetően természetesen magasabban alakult.



63. ábra Átlagos letöltési sebesség Carrier Aggregation-nel (L08, L18, L26) [Forrás: mérési eredmény]

Utolsó vizsgált (valamint a torlódó cellák definíciójában is részt vevő) paraméter az átviteli időintervallumban egyszerre kiszolgált felhasználók száma (szektoronként 3 felhasználó/TTI felett, a másik két torlódási kritériumfeltétel mellett számít egy cella kapacitásproblémásnak az értelmezésben). Ebben a mutatóban az L800-as cella 11:00-tól kezdődően több órán keresztül meghaladta a fent említett küszöbszintet (3 feletti peak-vel), az L1800-as layer pedig már korábban

08:00 -tól az esti órákig ezen limit felett volt (4,2-es peak-el), de a legmagasabb értéket az L26-os kapacitáscella érte el (6,4-es peak-el). Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy a rendelkezésre álló RB-okon az adott sávon (a PRB függvényében a RB száma, egy 10 MHz-es LTE vivő mellett 50 RB áll rendelkezésre, egy 20 MHz-es cella 100 RB erőforrással gazdálkodik) hány user osztozik az adott időintervallumban (azaz ms-umban). Kijelenthető, hogy ebben a mutatóban mindhárom cella meghaladta több órán keresztül a torlódó cellák küszöbszintjeinek értékét (64. ábra).



64. ábra Átlagos felhasználói szám per TTI (downlink) [Forrás: mérési eredmény]

A mobilcellák kapacitásának mérését a szolgáltatók rendelkezésére álló átlagos konfigurációja mellett végeztem élőhálózati környezetben. Az átlagos kapacitással rendelkező GSM (2 TRX) és a 3 LTE layer (800 MHz, 1800 MHz, 2600 MHz) vonatkozásában kijelenthető, hogy ez a konfiguráció országos átlagban nézve optimális összetételnek minősül kapacitási szempontból (a modernizáció és a további kapacitásbővítések megtörténteig).

A mérést megelőzően az üzemzavar lehetőségét kizártam, valamint preméréseket folytattam a megfelelő jelszint meglétére vonatkozólag mindkét technológián. A mérés analízise során egy esetleges vészhelyzeti eseménnyel egyenértékű forgalomemelkedés mellett vizsgáltam a G900, valamint az 800 MHz-es lefedő és 1800/2600 MHz-es kapacitás LTE cellákat.

A vizsgálat során meghatároztam, hogy az egyes frekvenciasávok az abból adódó cellaméretnek megfelelő helyről vették-e fel a forgalmat. Megállapítottam, hogy a GSM hálózat magas arányú Half Rate mellett is jelentős torlódásokat szenvedett a legforgalmasabb órákban, melyhez képest az LTE 800

VoLTE forgalma a GSM-nél nagyobb forgalmat torlódás és eldobott hívások nélkül is kezelni tudott. Az LTE hálózaton a VoLTE prioritást élvez az adatforgalommal szemben, így a VoLTE mutatók nem, de az RRC kapcsolódások sikerességi aránya mindhárom LTE layer-en degradációt mutatott. Ez a valóságban az adatkapcsolat sikertelen felépítését jelentheti. A L800 és L1800 tekintetében ez a mutató számottevően leromlott, mely kockázati tényezőnek számít a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából. A maximális RRC kapcsolódások száma az L800 és a L2600-as réteg tekintetében volt hangsúlyosabb, ugyanakkor a PRB tekintetében az L800-as cella elérte kapacitásának maximumát, a kapacitáscellákban maradt még tartalék. A throughput tekintetében kizárólag a L800-as cella romlott (és torlódó peremfeltétel egyike), ez a legforgalmasabb órában 3 Mbps átlagos letöltési sebességet jelentett, de a Carrier Aggregation használatával az adatátviteli sebesség ennél magasabb értékeket produkált. A TTI felhasználószám tekintetében viszont mindhárom cella elérte a torlódási szint peremfeltételét.

A vizsgálati példám alapján megállapítottam, hogy egy esetleges vészhelyzet során a forgalom drasztikus növekedése ellenére is biztosítottak látszik a folyamatos hangforgalom az LTE hálózaton, ugyanakkor az adatkapcsolat nem garantálható minden felhasználó számára, amely szintén elengedhetetlen a segélykéréshez és információszerzéshez ilyen helyzetekben. Megállapítható, hogy a kritikus órákban a kapcsolódási próbálkozások több száz signaling és adatfolyamra vonatkozó kérelem esetében sikertelennek bizonyultak, továbbá a legnagyobb és a beltéri lefedettséget biztosító 800-as layer tekintetében a TTI, a THP, és a PRB is kritikus szint alá eszik. Összességében kijelenthető, hogy még megfelelő hálózatoptimalizálói stratégiával sem lehetséges egy az átlagos igénybevételre méretezett hálózat esetén a vészhelyzeti kommunikációt minden esetben biztosítani.

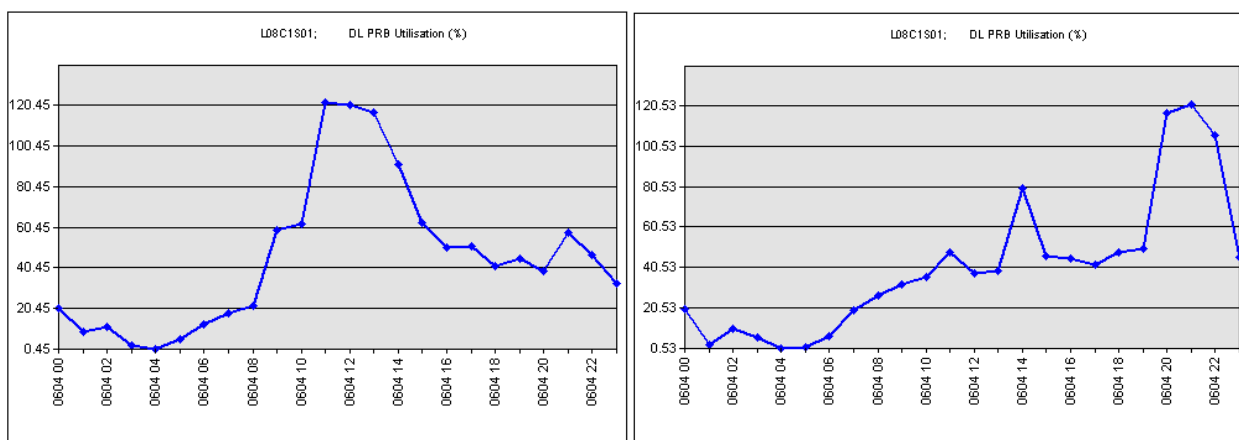
3.3.6 Kapacitás számítás network sharing esetén 4G hálózatokon

A fentiekből világosan kiderül, hogy a felsőbb sávú kapacitás layer-ek (frekvenciasávból adódó rosszabb jelterjedés miatt) nem képesek extrém forgalom esetén tehermentesíteni az L800-as lefedő cellát. A korábban meghatározott prognosztizálható forgalmonövekedés mellett várhatóan az 800 MHz-es frekvenciasávval közel azonos cellaméretet biztosító 700 MHz-es és 900 MHz-es sáv országos kiterjesztése esetén sem lesz minden esetben lehetséges a vészhelyzeti forgalmakat megfelelő mértékben kezelni az ezekben a sávokban rendelkezésre álló sáv szélesség miatt.

A GSM-hez hasonlóan egy elméleti szimulációt végeztem arra vonatkozólag, hogy az elérhető szolgáltatók celláinak aggregációjával és a forgalom elosztásával miként volna kezelhető az extrém forgalom. Példámban egy olyan operátort illesztettem be, amely szintén rendelkezik L800-as lefedéssel ugyanezen a helyszínen (ugyanekkora sáv szélességgel), illetve amelynek hálózatát nem érinti a rendkívüli esemény által generált magas load, tehát az csak napi átlagforgalmat kezel. Továbbá az átlagos felhasználószám vonatkozásában az operátorok közti tapasztalati különbségeket is figyelembe vettem. A fent analízis alá vett L800-as mobilcella mellé tehát egy kevésbé terhelt cella kapacitását társítottam, valamint számítások segítségével aggregáltam a két cella forgalmát [100].

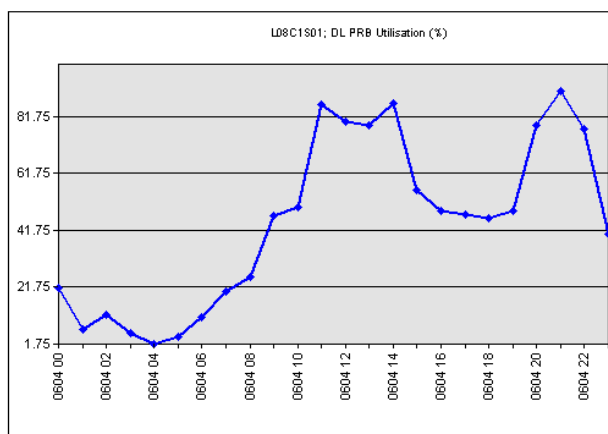
A fentiekben vizsgált cella uplink PRB mutatója, azaz a cella erőforrásainak kihasználtsága – a legforgalmasabb órában (11:00 - 12:00) – kb. 100% volt, míg a szimulált operátor azonos sáv szélességű cellája ugyanezen órában kb. 20%-os kihasználtsággal üzemelt. A két cella kumulált aggregált eredménye a cellák erőforrásainak egyesítését követően uplink irányban 65%, tehát az erőforrások egyesítését követően az uplink irányú forgalom kezelhetővé vált. A vonatkozó diagramok **27. Mellékletben** találhatóak.

Ezt követően a downlink irányú cellakihasználtság alakulását vizsgáltam. A forgalmi terheltség csúcsosodásakor a vizsgált túlterhelt cella kihasználtsága 120% körül mozgott (65. ábra), a szimulált szolgáltató cellája pedig 50%-os resource block kihasználtság mellett üzemelt. Az aggregált hálózat a két cella erőforrásait egyesítve pedig kb. 82%-ot ért el (66. ábra), mely szintén alátámasztja a kapacitás egyesítés pozitív hatásait.



65. ábra Downlink PRB kihasználtság – a legforgalmasabb órában – teljes kapacitását kihasználó cella statisztikája (bal oldalt) [Forrás: mérési eredmény]

66. ábra Downlink PRB kihasználtság a szimulált operátor kevésbé terhelt 800-as cellája (jobb oldalt) [Forrás: mérési eredmény]



67. ábra Downlink PRB kihasználtság a két cella számítással való aggregációjával [Forrás: mérési eredmény]

Mind az uplink, mind pedig a downlink cella kihasználtság tekintetében (DL/UL - ~120/100 %) a túlterheltség fázisából megfelelő tartományba esett a cella kapacitásának mértéke a kevésbé terhelt cella erőforrásainak a terhelt cellával való aggregálásával (DL/UL - ~80/65 %), melynek downlink értékét a 67. ábra mutatja be. A fenti cellakapacitási aránypárt számtalan egyéb példával is alátámasztható volna,

ugyanakkor a metódus használata minden esetben pozitív irányba befolyásolná a kapacitáskezelést és eloszlását, amennyiben marad kihasználható erőforrás a szolgáltatók celláiban ilyen helyzetben.

A fenti megoldás kapacitás cellákra való kiterjesztésével a technológiák és frekvenciák aggregációjával, valamint a load balancer funkció használatával a vészhelyzeti kommunikáció folytonos elérhetőségének esélye nagyban növekedhetne. A gyakorlatban az operátorok minden hálózati erőforrását egybe vetve (minden frekvencia réteg egyesítésével) és a load balancer funkció alkalmazásával a hálózati terheltség szétosztásával a vészhelyzeti kommunikáció torlódásmentes működésének esélye maximalizálásra kerülhetne.

A teszttel a téma további kutatásának relevanciájára szerettem volna rávilágítani, melynek kifejtése a fentieknél jóval részletesebb és mélyebb analízist igényel majd.

3.4 Következtetések

Az eredményeket összesítve a vizsgálat rávilágított arra, hogy GSM 900-as cella, valamint az LTE 800-as lefedő layer (két kapacitáscella megléte mellett) is betorlódhatna egy esetleges vészhelyzeti esemény során a felhasználók tömeges forgalmazása esetén, továbbá kijelenthető, hogy a vészhelyzet okozta pánikban a forgalom a vizsgálatnál is jóval nagyobb mértékben megnövekedett volna.

Bizonyítottam, hogy a GSM hálózat átlagos kapacitással olyan mértékű torlódást szenvedhet el, mely a permanens hangszolgáltatás biztosítására nem képes, valamint megállapítottam, hogy az LTE hálózat tekintetében még 3 layer esetén sem lehetséges biztosítani a folyamatos adatátvitelt a vészhelyzeti eseményben érintett felhasználók számára.

Vészhelyzetek bárhol kialakulhatnak az ország területén. Az összes operátor minden cellája különböző forgalmi adatokat produkálnak, a fenti példában vizsgált néhány cella és azok szolgáltatók közti aggrációja egy eshetőség az élőhálózatból hozható hatalmas mintahalmazból. A valóságban több százezer celláról beszélhetünk az operátorok hálózatában, melyek vonatkozásában kijelenthető, hogy a szolgáltatók minden technológiája és frekvenciasávja összefogásával és a forgalom egyenletes eloszlásával minden esetben pozitív irányba volna lehetőség terelni a vészhelyzeti kommunikáció során fellépő kapacitás kezelését.

A kapacitásproblémák minimalizálása, valamint az erőforrások maximalizálása érdekében mobil operátorok hálózati kapacitásának aggregálását javaslom a Core hálózatok összekapcsolásán keresztül, azért, hogy vészhelyzeti alkalmazás esetére a hálózati erőforrások – az operátorok elérhető technológiai és az alkalmazott frekvenciasávjai között – egyenletesen eloszlásra kerülhessenek a különböző terhelésselosztó funkciók alkalmazásával.

A network sharing kapacitás szempontból való aggregációját nagy műszaki kihívás, ugyanis a szolgáltatók Core hálózati elemeinek összekapcsolására is szükség van további technikai lépések realizálása mellett. Mindemellett a szolgáltatók elérhető hálózatai között egy ún. load balancer funkciót is alkalmazni szükséges, mely eljárással a hálózati terheltség egyenletesen eloszlásra kerülhet az egyes

szolgáltatók technológiai és frekvenciasávjai között. Ezen feature bevezetése további nehézségekbe ütközhet annak tükrében, hogy a szolgáltatók különböző bázisállomás beszállítókat alkalmaznak, tehát a technológia eltérések harmonizálása szintén elengedhetetlen.

4 LEFEDETTSÉGI PROBLÉMÁK VÉSZHELYZETBEN

A mobil hálózatok önműködően képesek átszervezni struktúrájukat, ha valamely bázisállomással probléma merülne fel, a rendelkezésre állást tekintve a redundancia adott lehet. Ez főként nagyvárosi környezetben igaz, ahol a bázisállomások sűrűn helyezkednek el [57], viszont vidéki területeken, ahol bizonyos települést csak egyetlen bázisállomás lát el, úgy ezek kimaradása kritikus lehet a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából [101]. A bázisállomások kiesésével járó hírközlési „károk” mértékét nagyban befolyásolja az alkalmazott frekvencia és az adott technológia is [41], mely meghatározza a hangszolgáltatás és az adatátviteli sebességek degradációját [102]. A szolgáltatók bázisállomásainak földrajzi elhelyezkedése, alkalmazott antennakonfigurációi és hardverei eltérnek egymástól, így vészhelyzet esetén különböző szolgáltatók hálózatainak elérhetősége és performanciája között releváns különbségek adódhatnak a rádiós lefedettséget és az általa biztosított minőséget illetően [103]. A vészhelyzeti segélyívók számok (pl. 112) használatával kizárólag hanghívás formájában kezdeményezhető segélykérés, ugyanakkor a krízishelyzetben érintett felhasználók számára szükség volna az adathálózat igénybevételére is az információszerzés és tájékoztatás lebonyolításához, továbbá, hogy a segélyhívón kívül egyéb irányú hangforgalmat bonyolíthassanak le. A fejezetben szeretném megvizsgálni a bázisállomások kiesésével járó következményeket városi és vidéki környezetben, továbbá a szolgáltatók lefedettségi erőforrásainak megosztására vonatkozó lehetőségeket. Ez azt a célt szolgálná, hogy a vészhelyzet sújtotta területen belül tartózkodók – elérhető mobilszolgáltatás megléte esetén – feltétlen rá tudjanak kapcsolódni valamely szolgáltató hálózatára.

4.1 Vészhelyzeti kommunikáció analízise kieső bázisállomások esetén

Fontosnak és aktuálisnak érzem azokat az eseteket vizsgálni, amikor vészhelyzeti eseményből adódóan egy-egy bázisállomás szolgáltatása kiesik (pl. háború kapcsán vagy terrorcselekményből adódóan fizikailag sérül, vagy megsemmisül), és elemezni, hogy a vészhelyzeti kommunikációra nézve ez milyen következményekkel járhat. A városi és vidéki környezetet külön analizálom e tekintetben, valamint szimulációk és predikciók elvégzésével meghatározom, hogy a meglévő állomások milyen mértékben képesek pótolni a kiesett állomást [104].

A segélykérő hívások kezdeményezésének feltétele (hatósági segélyhívó), hogy valamelyik szolgáltatónak legyen az adott területen lefedettsége. Amennyiben a honos operátornak nincsen ellátása az adott területen, úgy a vészhívás azon a hálózaton keresztül fog végződni, amely rendelkezik a vészhívás lebonyolításához szükséges lefedettséggel. Fontos arra is kitérni, hogy vis maior helyzet bárhol és bármikor kialakulhat az ország egész területén, így annak a valószínűsége, hogy egyáltalán nem vagy gyengén ellátott területen történhet vészhívás a technológiák nagy arányú kiépítettsége ellenére sem

elhanyagolható. Amennyiben a vészhelyzetek, kritikus helyzetek nagyvárosokon vagy belterületen kívül fordulnak elő, úgy a szolgáltatók eltérő helyeken található bázisállomásai a lefedettség tekintetében nagyban eltérhetnek egymástól. Ebben a fejezetben olyan esettanulmányokat kívánok vázolni, melyek ismertetik a szolgáltatók különböző állomáslokációjából adódó műszaki-technológiai különbségeket, valamint meghatározzák ezek jelentőségét a vészhelyzeti kommunikációra nézve.

A tapasztalatok szerint már egy-egy bázisállomás kiesése is jelentős problémát okozhat vészhelyzetekben, mely városi környezetben kevésbé, azonban vidéki környezetben nagyobb mértékben járhat kritikus következményekkel a vészhelyzeti kommunikációra nézve [105][106]. Továbbá feltételezem, hogy az operátorok bázisállomásainak elhelyezkedése nagyban befolyásolja a szolgáltatás elérhetőségét, melynek tükrében megalapozott a network sharing vészhelyzeti kommunikációba való bevezetése. A lefedettség szempontból történő network sharing vonatkozásában a szolgáltatók felhasználói az operátorok által biztosított összes hálózatot igénybe tudnák venni, amennyiben erre szükség volna. Ez azt jelentené, ha egy vészhelyzetben érintett felhasználó honos operátorának nincs megfelelő lefedettsége egy adott területen, valamint bármely más szolgáltatónak igen, úgy a felhasználók átterelésre kerülnének az elérhető hálózatra biztosítva ezzel a folyamatos hang és adatforgalmat. A fejezetben tehát a network sharing lehetőségét lefedettségi aspektusokból fogom elemezni.

A vizsgálataim 2G és 4G hálózatokra terjednek ki. A 3G hálózatok lekapcsolását követően már csak a 4G hálózatok és a 2G hálózatok nyújtanak országos lefedettséget, valamint csak ezeken a technológiákon lesz lehetőség hangforgalmat bonyolítani. Az 5G technológia kiépítése az értekezés megírása alatt még javában zajlik, az átmenő forgalom még alacsony, valamint a terminál támogatottság is csekély. Ennek tükrében a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából a 3G technológiákat irrelevánsnak ítélem meg, az 5G hálózatot pedig korainak analízis alá venni.

A fejezetben lévő analíziseket, beleértve a predikciókat és szimulációkat egy a rádióhálózatok tervezésére alkalmazott szimulátor segítségével végeztem el (Aircom, Planet), amellyel az előhálózati térerősségértékek és a hálózati paraméterek teljeskörűen lemodellezhetőek. A szimulátor által használt algoritmusok és modellek segítségével prediktálhatóak a valóságban tapasztalható és mérhető lefedettségi (pl. jelszint, térerősségérték, szolgáltatás elérhetősége stb.) és a hálózat minőségét reprezentáló mutatók (pl. minőségi performanciás értékek). Az azonos paraméterekkel és konfigurációkkal működtetett bázisállomások megközelítőleg tehát azonos módon teljesítenek a valóságban a teljesítményszinteket, cellahatárokat, minőségi paramétereket vagy egyéb a fizikai dimenziókat illetően.

A hálózati mérésekhez, a szimulációkhoz és predikciókhoz használt alapelvek vonatkozásában a jel szabadtéri csillapítását, valamint az antennából kisugárzott teljesítmény számítását mutatom be az alábbiakban.

A szabadtéri csillapítás, mely alatt az adott forrásból kisugárzott elektromágneses hullámok térerősségének csökkenését értjük a következőképpen kerül számításra a szoftverben:

$$FSL = 20 \log_{10}(F) + \log_{10}(D) + 32,44 \text{ (dB)}, \quad (7)$$

- F: frekvencia (MHz);
- D: a távolság (km) [72].

Az EIRP kalkulációkat, azaz az effektív izotróp kisugárzott teljesítményt az adó teljesítménye, az antennával összekötő kábel vesztesége, valamint az izotróp antennához viszonyított antennanyereség határozza meg [107].

$$EIRP = ET - FCS - JCS + ANY \text{ (dBi)} \quad (8)$$

- ET: erősítő (RRU) kimeneti teljesítménye;
- FCS: Feeder kábel csillapítása (amennyiben van);
- JCS: Jumper kábel csillapítása (RRU és antenna között ~0,5 m-es koaxiális kábel);
- ANY: Antennanyereség [108].

4.1.1 4G bázisállomás kiesése nagyvárosi környezetben

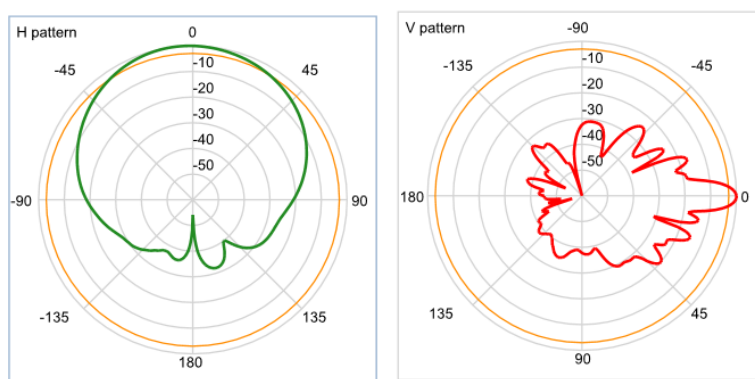
Nagyvárosi környezetben a bázisállomások sűrűn helyezkednek el, jellemzően egymástól néhány száz méterre. Ennek oka a sűrű beépítettség és a magas épületek, valamint a népességszámból adódó nagy kapacitásigény. A jelterjedés és az egyes technológiák kisugárzására alkalmazott frekvenciák közti összefüggéseket röviden összefoglalva a következőképpen lehetséges jellemezni. Minél alacsonyabb az alkalmazott frekvencia, annál jobb a jelterjedés, tehát a jel szabad térben, tárgyakon és anyagokon keresztül történő terjedése. A 2G hálózatok számára az országos lefedettséget biztosító réteg a 900 MHz-es spektrumsávban helyezkedik el, az LTE hálózatok számára ez a 800 MHz-es (deep indoor lefedettséget nyújtó) sávot jelenti. A lefedettség, illetve egy esetleges vészhelyzeti esemény szempontjából azon frekvenciasáv cellái relevánsak, amelyek országos és beltéri ellátottság szempontból a legkiterjedtebb lefedettséggel rendelkeznek, ezek az imént említett technológiák és alkalmazott frekvenciák. Ennek tükrében tehát a lefedettségre vonatkozó vészhelyzeti állomások különböző aspektusait a GSM 900 és LTE 800 technológián és frekvencián vizsgálom.

A következőkben azt szeretném taglalni, hogy műszaki szempontból milyen hatások észlelhetők egy esetleges vészhelyzet okozta helyzetben, ahol egy vis maior, terrorcselekmény (pl. robbantás) vagy háborús esemény során az egyes bázisállomások kiesnek. Szeretnék arra választ kapni, hogy a bázisállomások üzembiztonságának megszakadása esetén a lefedettség mennyiben degradálódhat, a kiesést követően pedig milyen eséllyel kezdeményezhető vészhelyzeti kommunikáció [109], valamint, hogy a környező állomások mennyiben képesek pótolni az üzemzavarban érintett állomást. A nagyvárosi bázisállomás struktúra kedvezőnek tekinthető a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából, mert városi környezetben a bázisállomások néhány száz méterre helyezkednek el egymástól, valamint a rádiós jel az épületekről való reflexió miatt nagyobb eséllyel juthat el a kiesett bázisállomás kiszolgálási területére, mint a vidéki területeken.

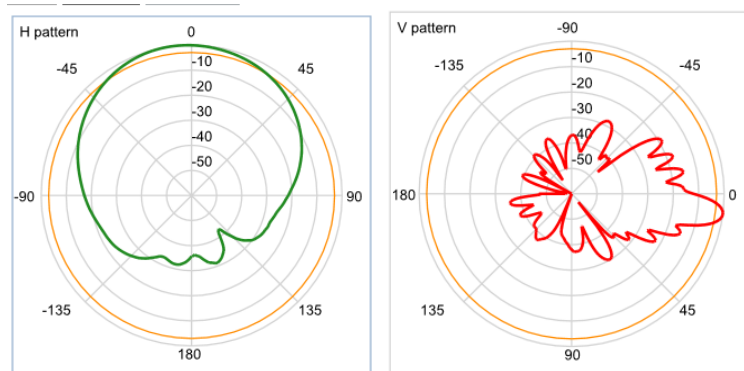
Elsőként az LTE hálózatot vizsgálom nagyvárosi környezetben, a predikciók lefuttatásához használt mérési konfigurációt, és az ahhoz tartozó EIRP számítás a mellékletben foglaltam össze (**28. Melléklet**).

Minden bázisállomást azonos konfigurációval terveztem, az antennamagasságokat és elektronikus dőléseket realisztikus módon változtattam annak érdekében, hogy a teszt minél jobban közelítsen a valósághoz.

A szimulációhoz igénybe vett antenna -45° -os XPOL ágának horizontális (68. ábra) és vertikális (69. ábra) karakterisztikája a következő ábrán látható, **piros** körrel jelölve az antenna 3 dB-es pontja, -10-es körrel pedig az antenna 10 dB-es csillapítási pontja. A horizontális karakterisztika fő sugárzási irányhoz képesti 3dB-es csillapítási pontja $34,5^\circ$ -ra, vertikális karakterisztika esetén $3,5^\circ$ -ra, a horizontális karakterisztika 10 dB-es pontja $62,5^\circ$ -ra, a vertikális karakterisztikáka pedig $6,5^\circ$ -ra található. Az antenna előre-hátra viszonya 30 - 40 dB, tehát az antenna ennyivel nagyobb jelet sugároz a fő sugárzási irányban, mint az azzal ellentétes irányban [110].



68. ábra A használt antennák horizontális és vertikális sugárzási nyalábjai [Forrás: saját szerkesztés]



69. ábra A használt antennák horizontális és vertikális sugárzási nyalábjai 8 fokos electric tilt esetén [Forrás: saját szerkesztés]

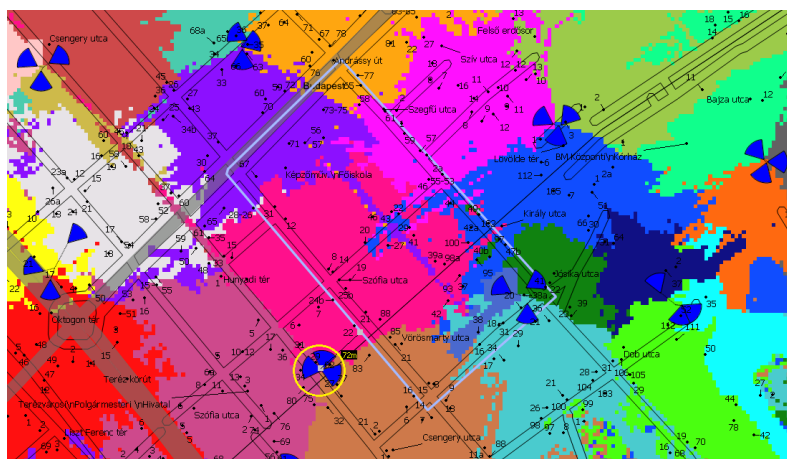
A nagyvárosi környezetben való szimulációra az alábbi beépítettségű helyszínt választottam élőhálózati struktúrának megfelelő tervezéssel, a helyszínt reprezentáló clutter-ek (épületbeépítettség) és azok vizuális megjelenése (az épületeket és azok magassága) a 70. ábra segítségével figyelhető meg. A vizsgálni kívánt területet ($0,094 \text{ m}^2$) **kékkel** kereteztem be.



70. ábra Az alkalmazott beépítettség jelölései és azok vizuális megjelenítése a vizsgált környezetben [Forrás: saját szerkesztés]

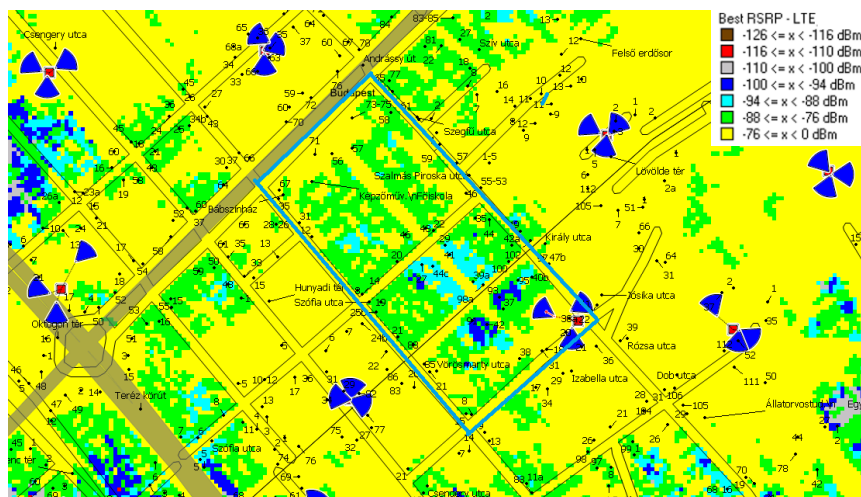
A bázisállomások egyes szektorai különböző pontban vannak jelölve, mert a valóságban egy háztetőn vagy tetőterazon installált antennarendszer egyes szektorai – lehetőség szerint – az épületek széleire kerülnek telepítésre annak érdekében, hogy az épületcsillapítást minimalizálják. A kék szektorok jelölik az L800-as irányokat, a zöld szektorok pedig az L18 kapacitás layer celláit. Ahogyan azt fentebb vázoltam kizárólag az erősebb és deep indoor lefedettséget biztosító 800 MHz-es sávra fut majd a szimuláció, mely során beltéri predikciókat fogok végezni, azaz az épületek által okozott csillapítással is kalkulálok majd. A vészhelyzeti kommunikáció szempontjából a beltérben tapasztalható jelszintekre fogok következtetni, mert egy vészhelyzet során mind kültérben, mind pedig beltérben szükséges a mobil kommunikáció megléte. Amennyiben beltérben a szolgáltatás elérhető, úgy a kültéri kapcsolat is rendelkezésre áll, továbbá a beltéri analízis módszerével elmondható, hogy a szuboptimális scénáriók potenciáljára is kiterjed vizsgálatom.

A 71. ábra már csak a L800-as szektorok láthatóak **kékkel** jelölve, a lekapcsolni kívánt bázisállomás cellái pedig **sárgával** kerültek bekarikázásra, a bázisállomás 1-es (észak fele néző) cellája a kijelölt terület fő kiszolgálója, ezért került ez cella (és a bázisállomáson másik két szomszédos szektora) kijelölésre, mint a vészhelyzeti kiesésre kandidált állomás. A lekapcsolandó bázisállomás kb. 70 m-re helyezkedik el a kijelölt teszterülettől.



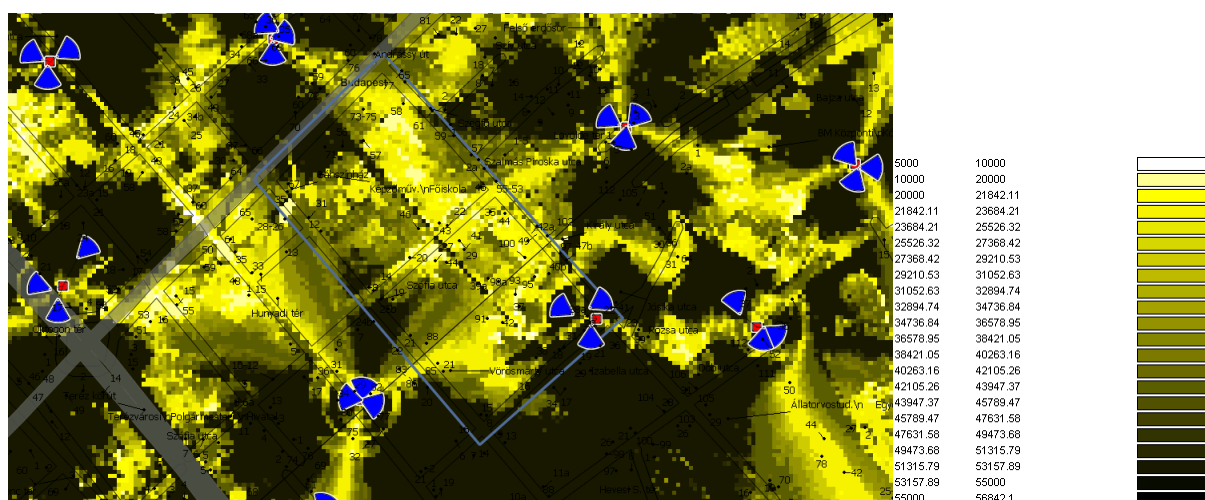
71. ábra A teszterületet kiszolgáló és a környezetében lévő állomások L800-as celláinak ellátási területe [Forrás: saját szerkesztés]

A szimulált esemény során tehát a vészhelyzetben érintett területen a felhasználók beltérben elérhető lefedettségét vizsgálom, valamint a kijelölt területen tapasztalt legrosszabb lefedettségű részeket, annak érdekében, hogy a teszterületen – a felhasználók által tapasztalható – legrosszabb térerősséget biztosító élményt detektálhassam és a vészhelyzetben tapasztalható legrosszabb eshetőséget vizsgáljam (ez a házak falain belüli vészhívást vagy adatkapcsolat kezdeményezését jelenti). A következő szimuláció (72. ábra) a kikapcsolást megelőző beltéri lefedettséget mutatja, a kültéri lefedettségből az épületek csillapítását levonva.



72. ábra A kikapcsolást megelőző lefedettség szimulációja, valamint a jelmagyarázat [Forrás: saját szerkesztés]

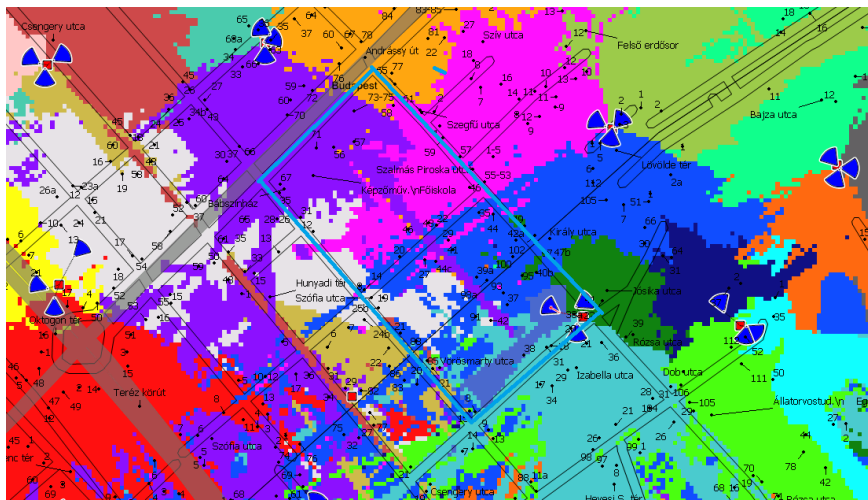
A területen tapasztalható beltéri RSRP teljesítményértékek megfelelnek mind az adatkapcsolat, mint pedig a VoLTE-hoz szükséges mértékhez, a legrosszabb beltéri jelszint -100 dBm-en belül alakult. A 10 MHz-es LTE cellákkal biztosítható adatletöltési értékeket – terheletlen hálózaton – a 73. ábra foglalja össze (Kbps-ben megadva).



73. ábra Adatletöltési predikció és jelmagyarázata [Forrás: saját szerkesztés]

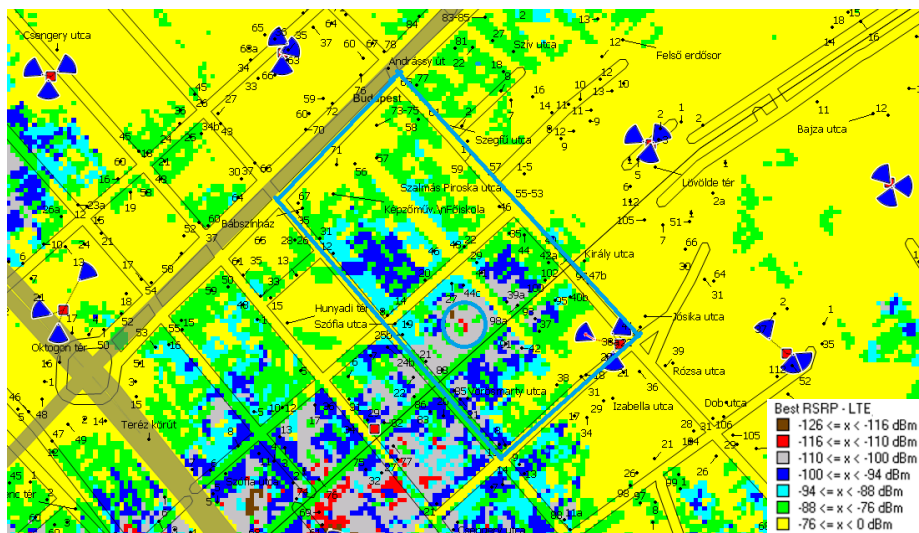
Megállapítható, hogy a letöltési sebesség lecsökken a cellahatárokon és azon területeken, ahol a jel/zaj viszony romlik, és egyre kevésbé domináns a kiszolgáló cella, a predikció a kültérben tapasztalható downlink irányú adatátviteli sebességet mutatja be.

Ezt követően azt az esetet szimulálom, amikor a teszterületet ellátó fent kijelölt bázisállomásban és celláiban valamilyen veszélyhelyzeti esemény során üzemzavar keletkezik vagy megsemmisül. A 74. ábra szemlélteti a kiesett bázisállomás után bekövetkezett cellák újrendeződését. Látható, hogy a környező cellák átvették a kiesett bázisállomások kiszolgálási területét, ugyanakkor a cellahatárok nem egyenletesek, mely arra enged következtetni, hogy nincs olyan cella, amely megfelelő jelszinttel és dominanciával át tudná venni a területet. Több cella, kisebb térerősséggel és rosszabb jel/zaj viszony mellett lát be a területre, ezek a cellák vették át a lekapcsolt site területét is.



74. ábra a kiesett bázisállomás után bekövetkezett cellák újrendeződése [Forrás: saját szerkesztés]

A beltéri RSRP szimuláción látszik, hogy a fő kiszolgáló bázisállomás celláit lekapcsolva mind annak környezetében, mind pedig a kijelölt területen is jelentős lefedettségcsökkenés zajlott le, az RSRP a terület egy részén már -100 és -110 dBm közé csökkent (**pirossal** jelölt pixel-ek a kiszolgálási területen belül). Így ezen a részen (ahol a legrosszabb a beltéri lefedettség) indítottam mérést azért, hogy pontos értékekkel számolhassak, ezt a területet **kék** körrel jelöltem a 75. ábra. Az elvégzendő mérések megegyeznek azokkal, amelyeket a valóságban is lehetséges lefolytatni a szükséges mérőműszerek segítségével. A predikciós program ezeket a méréseket is képes szimulálni, mely a mért értékekkel szoros korrelációban van.



75. ábra A lekapcsolást követő RSRP predikció, kékkel bekarikázva a teszterület legrosszabb értéke [Forrás: saját szerkesztés]

A következő táblázat az RSRP predikció **kéken** bekarikázott részének legrosszabb lefedettségű pontjában indított mérését szemlélteti, fentről a mért legerősebb kiszolgáló cellával, alatta pedig az ezt követő cellák teljesítményértéke látható, amelyet a felhasználók beltérben a házak falain belül tapasztalhatnak. A lekapcsolás után, a terület legkevésbé ellátott „picleiben” az új kiszolgáló cella -111 dBm-es jelszintet ért el beltérben (kb. 0,5 km távolságból ellátva a területet), és -9,6 dB RSRQ-val. Az RSRP érték igen alacsony, az RSRQ szint pedig a még elfogadható zónában van. A VoLTE hívás sikeressége a mért mutatók mellett nem garantálható, de vélhetően lehetséges volna hanghívást indítani. Az elérhető maximális adatátviteli sebesség az adott minőségi és lefedettségi paraméterek mellett terheletlen hálózaton 17829 Kbps, mely városi átlagforgalom mellett jóval alacsonyabban alakulna a valóságban [111].

3. táblázat A RSRP plot kéken bekarikázott részének legrosszabb lefedettségű pontjában indított mérés beltérben [Forrás: saját szerkesztés]:

Cell	Carrier	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	Downlink Loss (dB)	Adatátviteli sebesség (Kbps) – No traffic	(km)
Nyugati cella_1-es szektor	L08_10MHz	-111,00	-9,60	129,00	17829	0,50

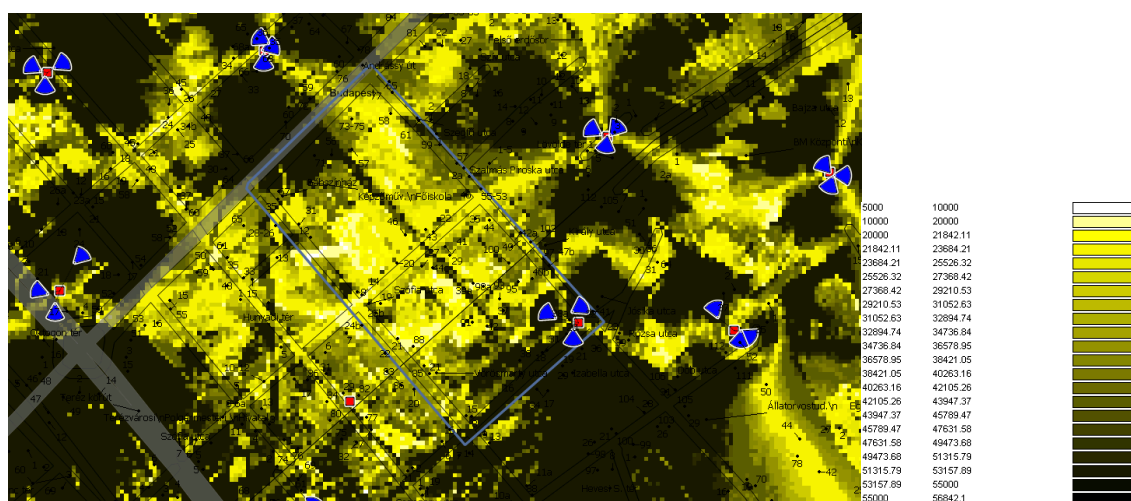
Ezek az értékek azonos pontban mérve kültérben a következőképpen alakulnak a legdominánsabb (kiszolgáló) cella jelszintjét mérve (4. táblázat).

4. táblázat A RSRP plot kéken bekarikázott részének legrosszabb lefedettségű pontjában indított mérés kültérben [Forrás: saját szerkesztés]:

Cell	Carrier	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	Downlink Loss(dB)	Adatátviteli sebesség (Kbps) – No traffic	(km)
Nyugati cella_1-es szektor	L08_10MHz	-93,00	-9,37	111,00	23635	0,50

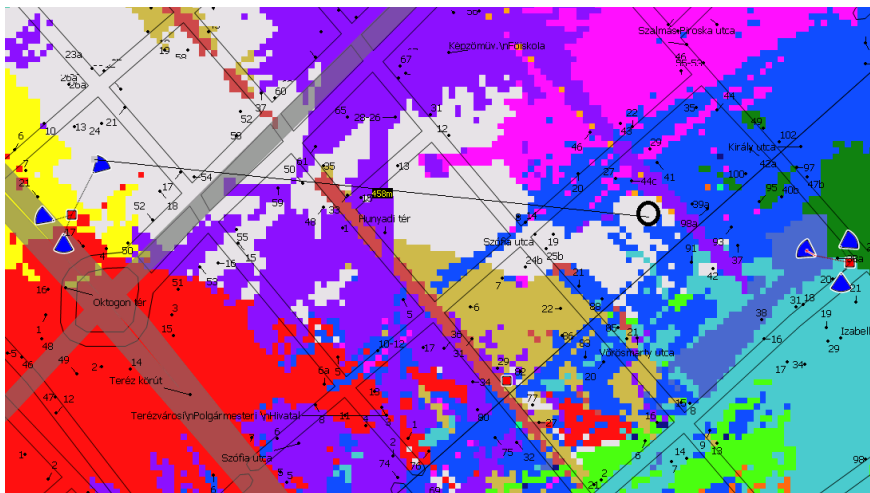
A kültérben mért lefedettségi és minőségi paraméterek mind az adatkapcsolatra, mind pedig hanghívásra (VoLTE) vonatkozólag alkalmasak lehetnek terhelt hálózaton is.

A downlink irányú adatsebességeket terheletlen hálózatra szimulálva a 76. ábra mutatja be (kültérben). Megállapítható, hogy a teszterületen a domináns cella lekapcsolásával az elérhető adatátviteli sebességek jelentősen leromlottak.



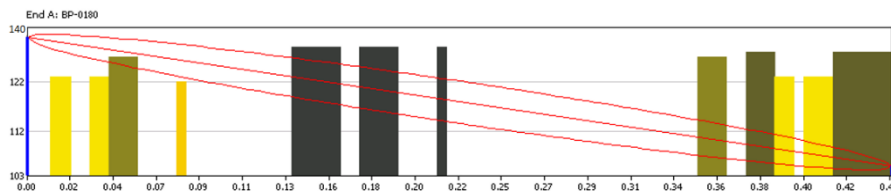
76. ábra A downlink irányú adatsebességek terheletlen hálózatra futtatva a szimulációt [Forrás: saját szerkesztés]

Megállapítható, hogy lekapcsolást követően a lekritikusabb jelszinttel ellátott pontban egy távoli kiszolgáló cella (kb. 0,5 km távolságból) vette át a lekapcsolt bázisállomás 3-as cellájának területét (77. ábra).

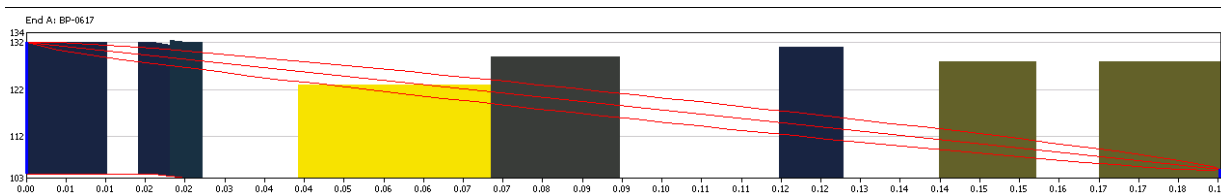


77. ábra A legrosszabban lefedett pontban egy távoli kiszolgáló cella kb. 0,5 km távolságból vette át a lekapcsolt bázisállomás 3-as cellájának területét [Forrás: saját szerkesztés]

A cella digitális terepmoellje a bázisállomástól a legrosszabb lefedettségű pontig a következő ábrán látható. Néhány épület ugyan okoz a Fresnel-zonás kitakarást [112], de az épületek számossága, illetve az épületcsillapításból származó jelcsillapítás kevesebb, mint a vizsgált ponttól keletre és jóval közelebb elhelyezkedő bázisállomásra. A nyugatra elhelyezkedő bázisállomás magasabban helyezkednek el (5+emeletes háztetős állomás), mint a keletre lévő állomás antennái. A nyugati távolabbi állomás és a keleti közelebbi állomás terepmetszetét a következő két ábra (78. ábra és 79. ábra) szemlélteti.



78. ábra A kiszolgáló nyugati cella és a legrosszabb lefedettséggel rendelkező pont közti terepmetszet és Fresnel zóna [Forrás: saját szerkesztés]



79. ábra A legrosszabb lefedettséggel rendelkező pont és a tőle keletre elhelyezkedő bázisállomás közti terepmetszet és Fresnel zóna [Forrás: saját szerkesztés]

A kijelölt teszterületen statisztikát is készítettem a tapasztalható jelszintekről, mely azt mutatja meg, hogy a terület hány %-ában teljesül az adott kategória. -100 dBm és -88 dBm közötti jelszintet a terület kb. 98 - 99%-án sikerült detektálni a bázisállomás lekapcsolását megelőzően (beltérben), -76 dBm-nél is jobb jelszintet pedig a terület kb. 60%-án mértem.

A bázisállomás lekapcsolását követően -100 dBm és -88 dBm közötti jelszint már csak a terület kb. 92 - 83%-ban volt mérhető, -76 dBm-nél jobb érték pedig a vizsgált városrész kb. 46%-án. Megállapítható, hogy a lefedettségveszteség számottevő volt. A fenti mérési statisztikákat a **29. Melléklet**be csatoltam be. A fenti szimulációk rávilágítottak arra, hogy nagyvárosi környezetben, ahol a bázisállomások sűrűn, egymástól néhány száz méterre helyezkednek el, az egyes bázisállomás kiesése esetén a környező bázisállomások cellái képesek átvenni a kiesett bázisállomás területét és tovább biztosítani a szolgáltatást. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy már egyetlen bázisállomás kiesésével jelentős visszaesés tapasztalható a térerősség és minőség terén, mely a forgalommal terhelt hálózaton a szimulációban bemutatottnál nagyobb degradációkat okozhat a 4G VoLTE és az adatkapcsolatok vonatkozásában. Továbbá kijelenthető, hogy a VoLTE szolgáltatáshoz szükséges feltételek beltérben még városi környezetben sem feltétlen biztosítottak a kiesett bázisállomás kiszolgálási területén (a környező állomások által). Az elérhető adatletöltési sebességek vonatkozásában is nagymértékű degradációt mértem, és a terheletlen hálózaton prediktált kapacitás arra enged következtetni, hogy terhelt hálózaton (a vészhelyzeti események során drasztikus forgalomnövekedés mellett) a felhasználók esetleg nem képesek vészhívás kezdeményezésére, rosszabb esetben az adatkapcsolat létesítése is ellehetetlenülhet. Egy vészhelyzeti szituációban a tapasztalható degradáció nagyobb mértékű, hiszen az adat és hangforgalom olyan mértékben ugrik meg, amely még busy hours-ben sem tapasztalható az éves átlagos eloszláshoz viszonyítva. A vészhelyzeti szituációk szimulálására a 3.2.1-es fejezetben taglalt magas user számú rendezvények alkalmasak, valamint az említett jelenségre legforgalmasabb/legterheltebb cellák analízise mutatott rá.

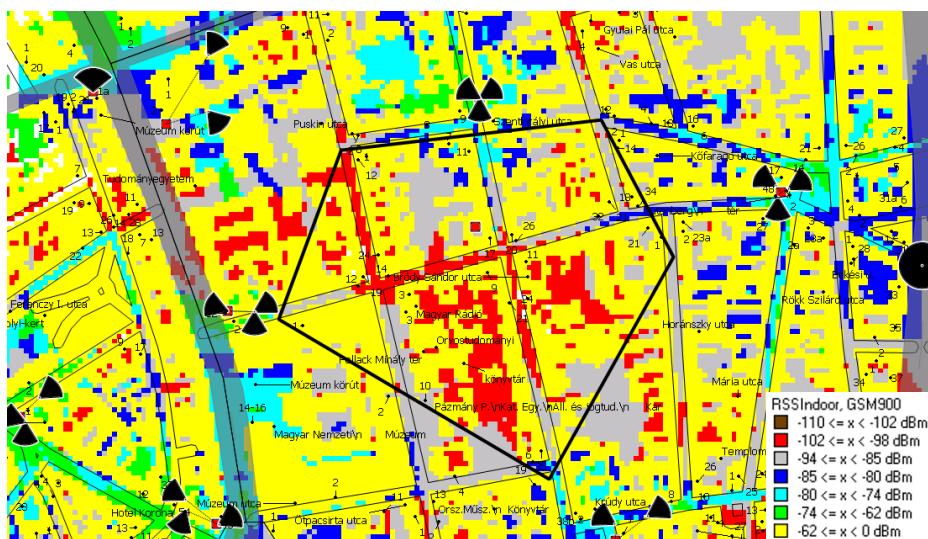
4.1.2 2G bázisállomás kiesése nagyvárosi környezetben

Ebben fejezetrészben a GSM hálózatot fogom az LTE-hez hasonló tekintetben elemezni. Vizsgálom, hogy az állomások esetleges kiesése milyen lefedettségi és minőségi változásokkal járhat nagyvárosi környezetben, a környező állomások miként „reagálnak”, valamint az ezzel kapcsolatos méréseket is elvégzem. A GSM EDGE technológiát a lekapcsolásra vonatkozó vizsgálataimban az alacsony elérhető adatátviteli sebesség miatt nem veszem számításba.

A mérési konfiguráció, valamint a kijelölt helyszín beépítésének (clutter) adatbázisa a **30. Melléklet**ben található.

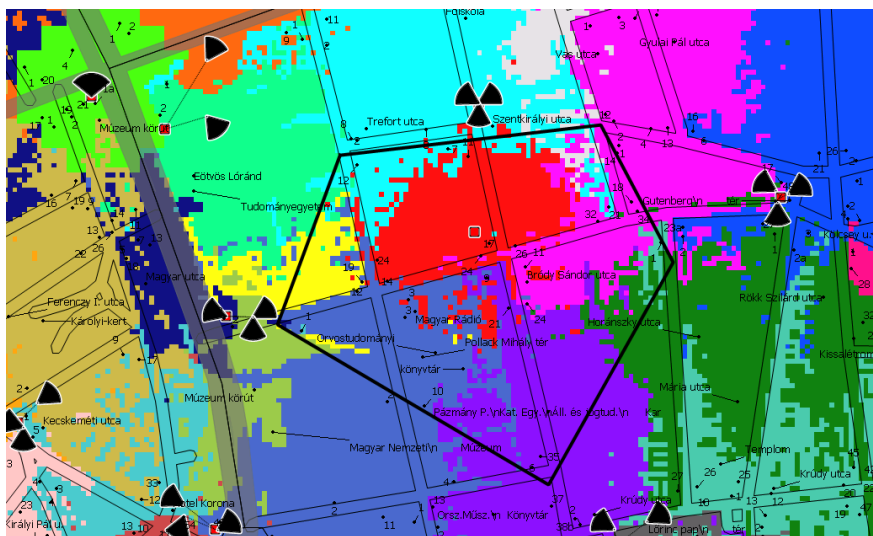
A GSM hálózat nagyvárosi környezetben lévő bázisállomásának meghibásodására vonatkozó szimulációk lefuttatására szintén egy forgalmas, site-okkal sűrűn fedett nagyvárosi részt választottam. A 80. ábra a cellahatáros predikciót mutatja be, mely magába foglalja a bázisállomások elhelyezkedését és a cellahatárok alakulását. A teszterület számára ezúttal a lekapcsolni kívánt GSM site kiszolgálási területét jelöltem ki (**feketével** bekeretezve).

környező bázisállomások szinte csillapítás nélkül „line of sight” látnak be ezekre a területekre, illetve nyújtanak szolgáltatást. Megállapítható tehát, hogy a szomszédos site-ok a lekapcsolt állomás kiszolgálási területének nagyobb részét megfelelően átvették, továbbra is biztosítva ezzel a hanghívások sikerességét egy esetleges vészhelyzet során.



82. ábra Teljesítmény predikció az épületszillapítások levonásával a beltérben tapasztalható lefedettséget szimulálva [Forrás: saját szerkesztés]

A lekapcsolás utáni állapotban a cellahatárok optimálisak, eloszlásuk homogén, mely megerősítés arra vonatkozólag, hogy a környező cellák dominánsan képesek ellátni a lekapcsolt site területét (83. ábra).



83. ábra Cellahatárokat jelölő predikció, a vészhelyzetet szimuláló lekapcsolt állomása, az új cellahatárok megfelelőek, a környező cellák dominánsan tudtak maradni [Forrás: saját szerkesztés]

A kijelölt GSM teszterületen is készült statisztika a tapasztalható jelszintekre vonatkozólag (31. Melléklet). A statisztika szerint a bázisállomás lekapcsolását megelőzően, -94 dBm és -85 dBm közötti jelszint a terület kb. 88%-án volt mérhető, -62 dBm vagy annál jobb érték pedig a terület kb. 62%-án.

A bázisállomás lekapcsolását követően -94 dBm és -85 dBm közötti jelszint már csak a terület közel 81%-án mérhető, -62 dBm vagy annál jobb érték pedig a terület kb. 58%-án volt jelen (31. Melléklet), a lefedettségvesztés a mérésekben is realizálható volt.

A GSM hálózaton szimulált bázisállomás kiesés nagyvárosi környezetben – valamilyen vészhelyzeti szituáció kapcsán –, erős beépítettség mellett statisztikailag kimutatható lefedettség romlást eredményezett, végeredményben a teszterület kb. 80%-án biztosítva ezzel a hívásindításhoz megfelelő lefedettséget az épületek falain belül (a korábbi 90%-hoz képest). A beltéri lefedettség tekintetében kijelenthető, hogy a környező bázisállomások megfelelő dominanciával képesek voltak átvenni a kiesett cellák kiszolgálási területét. Következésképpen szerintem egy bázisállomás kiesése nagyvárosi környezetben az esetek többségében nem okozna lefedettségi problémát a vészhelyzeti kommunikációra vonatkozóan azokon területeken ahol a bázisállomás lekapcsolását megelőzően is volt beltéri lefedettség.

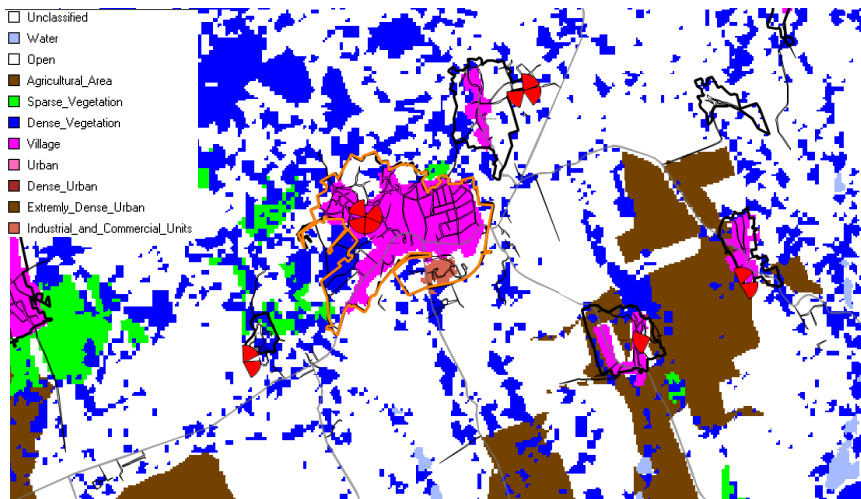
4.1.3 4G bázisállomás kiesése vidéki/kisvárosi környezetben

Szemben a városi területekkel, ahol a sűrű beépítettség és a magas épületeknek köszönhetően a bázisállomások néhány száz méterre helyezkednek el egymástól, a vidéki országrészben jóval kevesebb állomásra van szükség a kisebb beépítettség és alacsony épületmagasság miatt, valamint a cellák kapacitásának méretezése is alulmúlja a városi cellák erőforrás-szükségletét.

Egy bázisállomás átlagosan 1 - 3 települést lát el, mely esetenként akár több 10 km-t is jelenthet a két bázisállomás közt lévő távolság vonatkozásában. Ezért releváns azt vizsgálni, hogy egy-egy bázisállomás szimulált kiesése milyen hatással van a vészhelyzeti kommunikáció elérhetőségére, illetve a vizsgált esetekben mennyiben képesek a környező bázisállomások pótolni az adott site-ot. A városi analízishez hasonló struktúrában kerül felépítésre a szimuláció, mely során az élőhálózatot reprezentáló explicit mérési mutatók elemzésével együtt teszem meg következtetéseimet az üzemzavarban érintett bázisállomások esettanulmányaira vonatkozólag.

Olyan helyszíneken, ahol egyetlen állomás lát el egy települést és a legközelebbi szomszédos állomás nagy távolságra helyezkedik el, ott biztosan teljes lefedettségvesztéssel jár az állomás a kiesése, a kiszolgált település pedig teljesen ellátatlan marad. Ennek tükrében olyan helyszínt választottam a vidéki/kisvárosi kieső bázisállomások szimulációjára, ahol az analízisre kijelölt település közelében további állomások helyezkednek el.

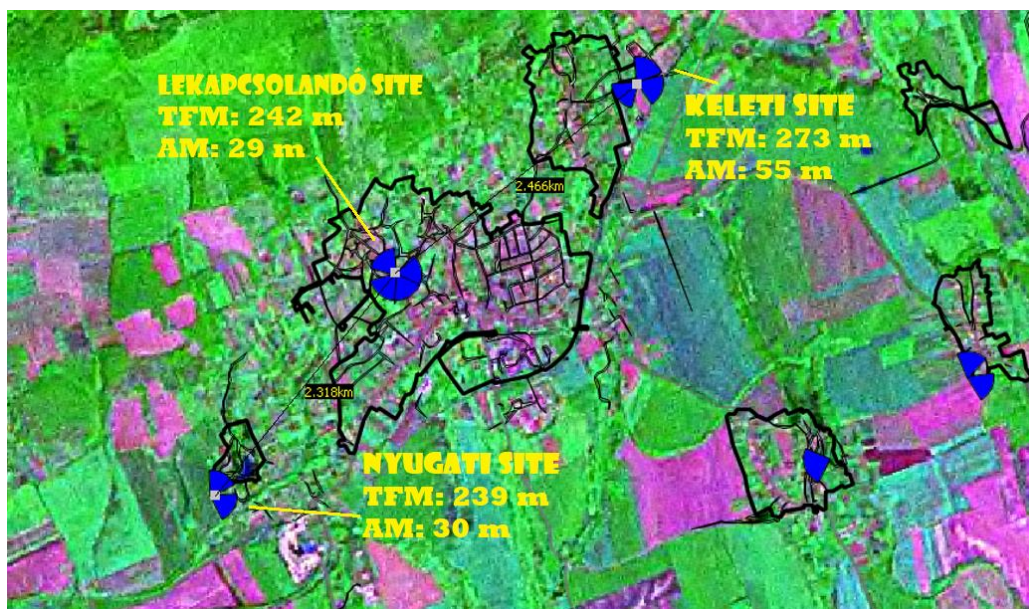
A 84. ábra a terület beépítettségének képét mutatja be, mely vidéki, kertvárosi, családiházak övezetnek felel meg. A szimulációkat beltéri lefedettségre prediktálom, azaz az épületek csillapítása levonódik a kalkulációban. A kiválasztott teszterületet **narancssárgával** jelöltem.



84. ábra A terület beépítettségének képe és azok jelentései [Forrás: saját szerkesztés]

A teszterület közepén található az üzemzavarra kandidált 4 szektorral rendelkező site (antennamagasság 30 m), melynek objektuma egy templom, az antennák a jellemzően 4 irányszöggel rendelkező ablakokba kerülnek telepítésre ilyen típusú állomások esetén, az ablakok irányai fixek, így a tervező által optimálisnak vélt antennairányok nem teljesülnek.

A 85. ábra az állomások elhelyezkedését foglalja magába, hogy a teszterülettől keletre kb. 500 méterre helyezkedik el (55 m-es antennamagassággal) a következő települést ellátó bázisállomás (2,46 km-re a lekapcsolandó site-tól), nyugatra pedig a szomszédos települést ellátó állomás található (30 m-es antennamagassággal) 1,2 km-re a vizsgálati belterülettől (2,3 km-re a lekapcsolandó site-tól). A keletre elhelyezkedő állomás viszonylag közel került implementálásra (a települések egymáshoz képesti elhelyezkedése miatt), ennél általában nagyobb távolságok a jellemzőek.

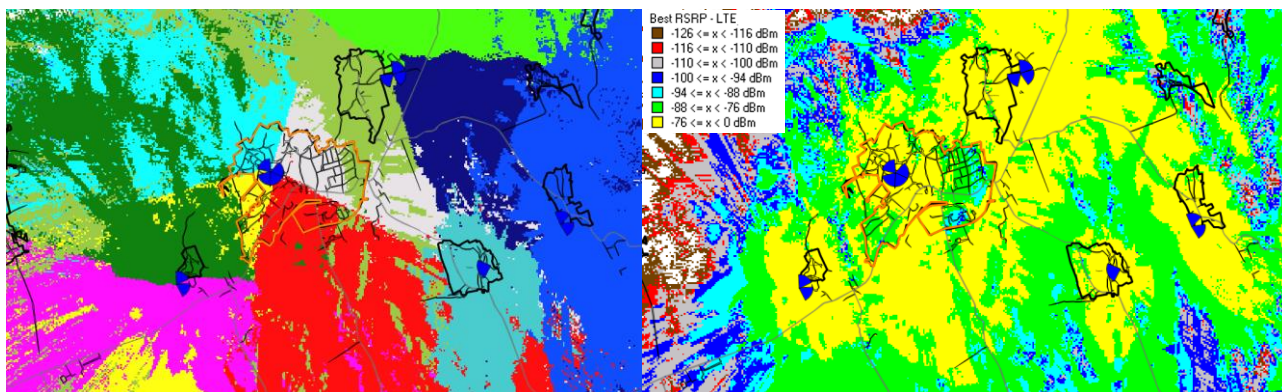


85. ábra Domborzati térkép és a vizsgálandó településrész, valamint az érintett bázisállomások megjelölése [Forrás: saját szerkesztés]

A korábban ismertetett aspektusok miatt az LTE 800-as hálózat celláit fogom vizsgálni, vivőszélességet ezúttal 20 MHz-nek választottam, mellyel duplájára növeltem az elérhető maximális teoretikus

adatátviteli sebességet a nagyvárosi tesztekhez képest (10 MHz). A mérési konfigurációt a **32. Melléklet** tartalmazza.

A következő két szimuláció (86. ábra, 87. ábra) szemlélteti ez eredeti állapotban tapasztalható cellahatárokat, melyen a vészhelyzetre kandidált bázisállomás cellái, valamint a szomszédos településeket ellátó bázisállomás kiszolgálási területe rajzolódik ki, továbbá az RSRP szimuláció eredménye látható (belső eredmény).

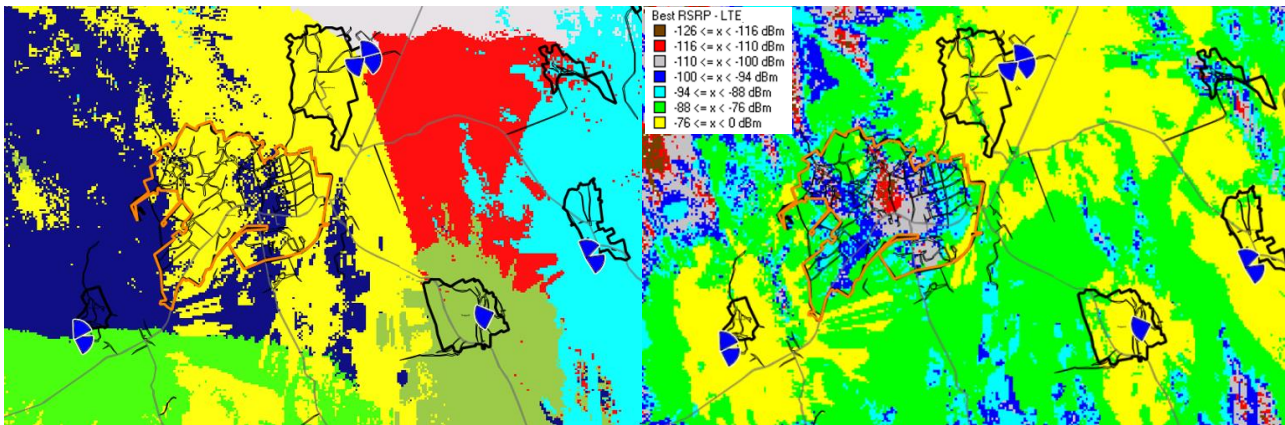


86. ábra Cellahatáros szimuláció (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

87. ábra RSRP predikció (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

Az RSRP szimuláción jól látható, hogy mind a vizsgálandó, mind pedig a vészhelyzetben érintett bázisállomás által ellátott település optimális jelszinttel kerül ellátásra, gyengébb lefedettség a település keleti részén tapasztalható. A RSRP mérésekről készített statisztikák a **33. Melléklet**ben láthatóak. Jó lefedettséget biztosító > -100 dBm érték a terület 100%-ban mérhető volt beltérben, a -76 dBm feletti legszigorúbb kategória pedig a terület kb. 63%-ban teljesült.

A 4 szektoros (vészhelyzetben érintett) állomás lekapcsolását követően (88. ábra, 89. ábra) az elérhető RSRP tekintetében egy lefedettségi „lyuk” keletkezik a kisváros belső területein nagy kiterjedéssel és kritikus jelszintekkel. Az RSRP szimulációból levonásra kerültek az épületek csillapításai, mivel a legszigorúbb állapotra szeretném vizsgálni a településrészt ellátó bázisállomás kiesésének következményeit. A területi alapon mért RSRP statisztikát illetően megállapítható, hogy a > -100 dBm-es jelszintet a lekapcsolást követően már csak terület 77%-ban mértem, a -76 dBm feletti értéket pedig a terület kb. 5%-ban, a bázisállomás kiesése tehát jelentős mértékű degradációt és lefedettségcsökkenést eredményezett (a mérésről készített statisztika a **34. Melléklet**ben található).



88. ábra A cellahatáros szimuláció a vészhelyzetben érintett bázisállomás kiesését követően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

89. ábra RSRP szimuláció a vészhelyzetben érintett bázisállomás kiesését követően (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

A kiesett bázisállomás helyét nyugatról „NYUGATI_SITE_1.cella” vette át, keletről pedig „KELETI_SITE_3.cella”. Utóbbi a település nagyobb részén lett kiszolgáló cella, mert az antennák magassága 55 m, tehát 1,5-szer magasabban helyezkednek el azok, mint nyugati állomás antennái (30 m). A lekapcsolást követően a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából relevánsnak tartom vizsgálni azokat a problémás területeket, ahol a jelszint -116 dBm és -110 dBm közötti eredményeket mutatott vagy ez alatt mozgott (a fenti RSRP predikción **piros** vagy **bordóval** jelölt pixelek), hogy az esetleges hívás és adatkezdeményezési problémákat detektálhassam. A mérőműszerrel felkutattam a területen belül tapasztalható legrosszabb mérhető jelszintet és itt végeztem el a mérést. A kritikus településrészen mért beltéri jelszint, minőség, valamint az adatátviteli sebességek mutatói az 5. táblázat szerint alakultak.

5. táblázat A lekapcsolást követően legrosszabban ellátott területen indított mérések eredményei – beltérben tapasztalható mérés [Forrás: saját szerkesztés]:

Cella	Carrier	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	Jelvesztesség (dB)	Adatátviteli sebesség (KBps)	Távolság (km)
KELETI_SITE_3.cella	L08_20MHz	-122,20	-11,36	139,00	13453	2,10
NYUGATI_SITE_1.cella	L08_20MHz	-125,20	-14,36	142,00		2,70

A kritikus helyszínen mért legrosszabb beltéri jelszintet biztosító cella a teszterülettől kb. 2,1 km-re keletre elhelyezkedő „KELETI_SITE_3.cella”, mely a mért területen kb. 122 dBm jelszinttel és -11,36-dB-es RSRQ-val van jelen.

A vizsgált pontban elérhető jelszint hálózatoptimalizáló szempontból határértéknek számít, ez az a küszöbszint, amely alatt a szolgáltatók már átterelik (handover) a felhasználókat a legacy hálózat felé (2G). A végterminál így hívásindítás esetén CSFB-t hajt végre a 2G felé, vagy amennyiben hanghívás közben éri el a küszöbszinteket a felhasználó a problémás területre való átmozgással, úgy SRVCC-t bonyolít le a rendszer. A mért jelszint és a RSRQ minőségi paraméter is kritikus szint alá esik, így a terület ezen részén az LTE hálózaton keresztül sem hanghívásra, sem pedig adatkapcsolat indítására nem volna lehetőség beltérben, mely a piros pixel-ekkel modellezett terület nagyobb részére szintén igaz.

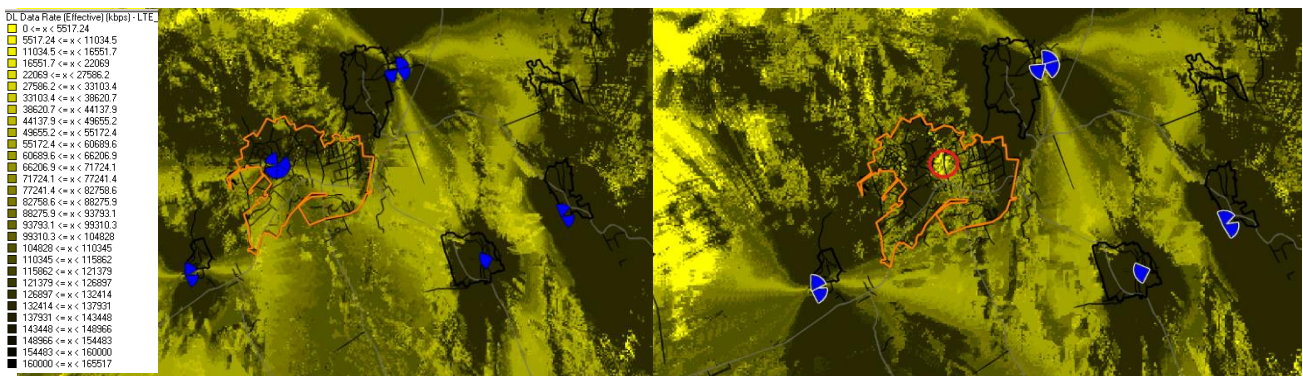
Ugyanezen mérési pontban vizsgáltam és szimuláltam a tapasztalható minőségi és lefedettségi mutatókat kültérben is, melynek eredményeit a 6. táblázat foglalja össze, a mérést már csak a kiszolgáló cellára végeztem el.

6. táblázat A lekapcsolást követően legrosszabban ellátott területen indított mérések eredményei – kültérben tapasztalható mérés [Forrás: saját szerkesztés]:

Cell	Carrier	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	Downlink Loss(dB)	Downlink Rate (KBps)	Data (km)
KELETI_SITE_3.cella	L08_shared	-114,2	-8,6	131	55647	2,1

A mért -114,2 dBm-es jelszint a hozzátartozó RSRQ-val és az 55647 Kbps teoretikus maximális elérhető adatátviteli sebességgel (terheletlen hálózaton) a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából adatkapcsolat kezdeményezését igen, de VoLTE hívás indítását (a beltéri méréshez hasonlóan) már nem biztos, hogy lehetővé tette.

A fenti RSRP és RSRQ értékek mellett vizsgáltam az adatátviteli sebességeket is a fenti vizsgált legrosszabban ellátott területen: a 20 MHz-es LTE cellán terheletlen hálózaton 13453 Kbps maximális teoretikus adatátviteli sebességet mértem beltérben, míg a kültéri mérés ugyanezen pontban 55647 Kbps-t mutatott. Az elvi maximális teoretikus adatátviteli sebesség ilyen spektrumszélesség mellett az alkalmazott 2x2 MiMo technológiával 150 Mbps volna [113][114], tehát a mért eredmények reprezentálják a minőség és kapacitás-degradáció mértékét. A beltéri throughput mértéke annyira alacsony a kritikus részen, hogy a vészhelyzeti forgalommal terhelt hálózaton hamar torlódások következhetnek be. A lenti ábrán látható a throughput lekapcsolás előtti állapotban (90. ábra), valamint azt követően (91. ábra). A lekapcsolást követő állapotra (piros körrel) jelöltem a fent vizsgált problémás részt (ahol a mérést elvégeztem a legkritikusabb pontban), a vizuális predikció is jól szemlélteti a throughput visszaesését a vizsgált részen [114].



90. ábra Az adatátviteli sebességek alakulása a tesztet megelőzően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

91. ábra Az adatátviteli sebességek alakulása a lekapcsolást követően, pirossal jelölve a legkritikusabban ellátott rész (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

A lekapcsolást megelőzően (90. ábra) a 4 szektoros bázisállomás kiszolgálási területén (főképpen a déli és nyugati irányba néző cellák területén) az elérhető adatátviteli sebesség gyengébb, mint másik két irány esetén. Ennek oka az állomástól dél-nyugatra (NYUGATI_SITE) és attól észak-keletre elhelyezkedő bázisállomás (KELETI_SITE) által okozott interferencia. Ezt ellensúlyozni az interferenciát okozó cellák

antennáinak, valamint a 4 szektoros állomás déli és nyugati cellák bedöntésével (elektronikus dőlés) lett volna lehetőség, növelve ezzel a 4 szektoros állomás cellainak dominanciáját a kiszolgálás területükön (jobb jel/zaj viszonyt elérve ezzel), valamint csökkentve a szomszédos cellák okozta interferenciát (zaj csökkentése), így a településen magasabb adatátviteli sebességet mérhettem volna a déli és nyugati cella kiszolgálási területén.

A vészhelyzetre kandidált állomás lekapcsolását követően (91. ábra) bizonyos részeken megnövekedett az elérhető sebesség, mely a fent leírtaknak köszönhető. Az adatátviteli sebesség vonatkozásában tehát bizonyos részeken (a 4 szektoros bázisállomás nélkül) magasabb értékeket mértem lekapcsolást követően a gyengébb elérhető jelszint ellenére, mely a site lekapcsolásával járó interferencia csökkenésnek volt köszönhető. A throughput-ra vonatkozó javulás a 4 szektoros állomás lekapcsolása nélkül is elérhető lett volna annak déli és nyugati cellájának fent említett hangolásával (további elektronikus dőlés alkalmazása).

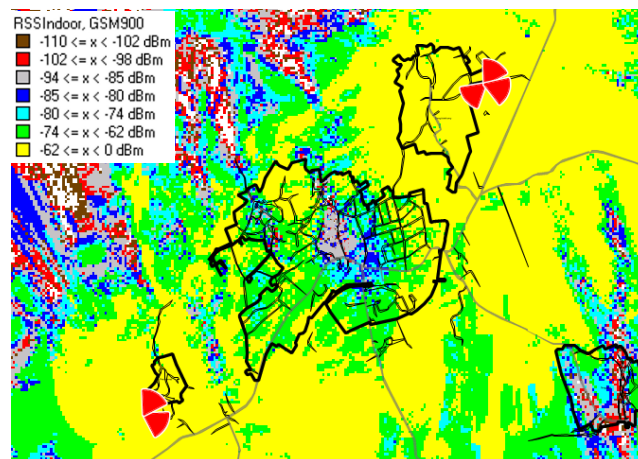
A vidéki környezetben szimulált vészhelyzeti szituáció, illetve esettanulmány segítségével számos következtetésre jutottam. A területet úgy választottam meg (egymáshoz közeli települések), hogy a vidéki környezet átlagos eloszlásához képest sűrűbben helyezkedjenek el az implementált bázisállomások, továbbá a településtől keletre található site antennáinak pozícióját az átlagosnál jelentősen magasabbra terveztem (55 m; az átlagos antennamagasság vidéki környezetben 30 m). A területeket ellátó 3 bázisállomás megfelelő jelszinttel és minőséggel látta el a településeket, melyet a premérések is igazoltak. A kieső bázisállomás lekapcsolásával a kisváros belső részeiben drasztikus lefedettségvesztés következett be, melyek a RSRP statisztikák is alátámasztottak. A teszterülettől keletre elhelyezkedő bázisállomás 3-as cellája a terület nagyobb részét vette át, a település kisebb részét pedig a nyugatra található site 1-es szektora. A lekapcsolást követően a település egy részén a szomszédos cellák nem voltak képesek megfelelő jelszintet és minőséget biztosítani, a vizsgált legkritikusabb területen a szimulált mérések alapján beltérben sem VoLTE hívás kezdeményezésére, sem pedig adatkapcsolat indítására nem lett volna lehetőség egy esetleges vészhelyzeti szituáció esetén (a tájékozódás és a mentési folyamatok megindítása érdekében). A kritikus helyszínen történő kültéri mérések alapján kijelenthető, hogy vészhelyzeti hanghívás kezdeményezésére vélhetően nem, adatkapcsolat igénybevételére azonban már lett volna lehetőség. A terheletlen hálózaton mért adatátviteli sebességek arra engednek következtetni, hogy egy vészhelyzeti szituáció által okozott emelkedett forgalom esetén nem maradna elegendő kapacitás a lekapcsolt állomás nélkül. Az analízis tehát rávilágított arra, hogy a fentiekben taglalt kedvező rádiós szcenárió mellett (közeli szomszédos állomások) egy-egy bázisállomás kiesésével a településen még a beltéri szolgáltatás is javarészt biztosított marad, de bizonyos részeken a vészhelyzeti kommunikáció nem vehető igénybe. Ez a hang és adatszolgáltatásra is igaz, melynek tükrében segítségkérésre, tájékozódásra a mentési és elhárítási utasítások vonatkozásában nem volna lehetőség. A szimulációk szerint a lekapcsolást követő legkritikusabb településrészekben kültérben fennállhat a lehetőség, hogy a szomszédos

bázisállomás által a kültéri adatkapcsolat biztosított maradjon, ugyanakkor a hanghívás sikeressége továbbra is kétségesnek bizonyult.

Azokon a településrészekben, ahol a jelszint és minőségi mutatók a kritikus szint alá estek, a felhasználókat a legacy hálózat felé terelné a rendszer, a következőkben röviden azt vizsgálom, hogy a kiesett bázisállomás nélkül a GSM hálózatokon volna-e lehetőség a vészhelyzeti hanghívás kezdeményezésére.

4.1.4 2G bázisállomás kiesése vidéki/kisvárosi környezetben

Az előzőekben alkalmazott mérési konfigurációk kerültek használatra a GSM cellák beállításaira vonatkozólag (teljesítmény szint eltérő) a vidéki vészhelyzeti szituáció szimulálására, ahol az előző esettanulmány következtetéseit szeretném tovább vizsgálni. A vészhelyzetben érintett bázisállomás lekapcsolását követő állapotot vettem analízis alá és méréseket végeztem. Arra szeretnék választ kapni, hogy azokon a részekben, ahol az LTE hálózatról leesnek a vészhelyzeti felhasználók, ott a GSM hálózat képes-e tovább biztosítani a vészhelyzeti kommunikációt.



92. ábra A teszterület hálózat beltéri jelszintjei a vészhelyzetben érintett bázisállomás lekapcsolását követően [Forrás: saját szerkesztés]

A GSM hálózat elérhető jelszintjei a kijelölt területen elfogadható maradt (92. ábra), leszámítva a település belső részeit (az LTE-n mért legkritikusabb településrészekben a GSM lefedettség is gyenge). Összeségében a terület közel 95%-ban megfelelő az elérhető beltéri teljesítményszint ahhoz, hogy vészhelyzetben hívásindításra legyen lehetőség. Ez annak is függvénye, hogy a kiszolgáló cellák számára interferencia szempontjából megfelelően izolált és optimális C/I értékeket elérő frekvenciaterv készüljön, hiszen a település belseje éppen cellahatáron helyezkedik el (a cellahatárokat nem mellékeltem, mert az kb. megegyezik az 4G cellák határaival), amely miatt még hangsúlyosabb szerepet játszik az optimális frekvenciaterv.

A mérési analízis a **35. Melléklet**ben kerül részletesen levezetésre, a lentiekben pedig ennek a konklúzióit mellékelem.

A teszterületen mért legrosszabb kültéri és beltéri jelszinteket a 7. táblázat foglalja össze, kültérben ez az érték megközelítőleg -96 dBm, mely jelszint egy optimális frekvenciaterv megléte esetén éppen a hanghívás lehetőségének határán mozog.

7. táblázat A teszterület statisztikái a mérhető legrosszabb pixel-ben vizsgálva kültérben és beltérben [Forrás: saját szerkesztés]:

Cell	GSM power (dBm)	Downlink Loss(dB)	(km)
Kritikus helyszín, kültéri mérés	-96	163	2,1
Kritikus helyszín, beltéri mérés	-90	169	2,1

Kijelenthető, hogy a GSM hálózat a vizsgált esetben képes volna biztosítani a folytonos hangszolgáltatást a 4G hálózat alatt egy esetleges vészhelyzet esetén, amennyiben a települést kiszolgáló bázisállomás kiesne. Továbbá megállapítható, hogy kritikus részeken indított vészhelyzeti hívások is sikeresen végződnek 2G-n (CSFB-et követően), a VoLTE hívások pedig sikeres SRVCC-vel volnának képesek a 2G felé handover-elni.

4.2 Network sharing vészhelyzeti megfontolásai

A network sharing vészhelyzeti alkalmazásának hipotézise egy példával egyszerűen szemléltethető. Egy esetleges vészhelyzet során, amennyiben egy operátornak – a következőkben részletezett infrastruktúrából adódó differenciák miatt – nincs lefedettsége egy adott területen, úgy a felhasználónak kizárólag a 112-es segélyhívó felkeresésére van lehetőség. Amennyiben a honos operátornak nincs szolgáltatása az adott ország részben, úgy ez a segélyhívás a helyszínen elérhető többi operátor hálózatán keresztül fog végződni (amennyiben bármely szolgáltatónak van lefedettsége az érintett helyszínen). A roaming szolgáltatás is hasonlóképpen zajlik, ha egy külföldi user forgalmazni szeretne a hazai operátorok hálózatán, valamint a honos szolgáltatója szerződéses viszonyban áll valamennyi hazai szolgáltatóval, úgy ezen operátorok hálózata közt akár manuálisan választhat. Ugyanakkor egy olyan vészhelyzeti krízishelyzet esetén, ahol egy hazai felhasználó próbál vészhelyzeti kommunikációt kezdeményezni és a honos operátornak nincsen szolgáltatása, úgy nincs lehetősége a vészhelyzeti hívás vagy adatkapcsolat kezdeményezésére a vészhelyzeti eseménnyel kapcsolatos információszerzés, vagy tájékoztatás céljából. Ilyen esetben kizárólag a 112-es központ hívására van lehetőség, mely egy nagy kiterjedésű vészhelyzeti esemény esetén túlterhelt lehet és más egyéb jellegű információszerzésre vagy tájékoztatásra nem volna lehetőség. Az értelmezésben a network sharing egy olyan vészhelyzeti esetre vonatkozó hálózatmegosztást jelent, melynek segítségével az egyes szolgáltatók felhasználói igénybe vehetnék a társszolgáltatók hálózatát is, amennyiben a honos operátornak egyáltalán nincs lefedettsége a vészhelyzetben érintett területen, vagy a terminál mérései alapján a társoperátor hálózatán jobb szolgáltatás minőséggel kezdeményezhetnének hang vagy adatforgalmat, vagy esetleg újabb technológiát és ez által megfelelő sávszélességet vehetnének így igénybe a vészhelyzeti kommunikáció lebonyolítására (pl. 2G helyett 4G technológiát optimális adatátviteli sebesség mellett). Különösen releváns a network sharing kérdésköre a határövezeti régióban, ahol a szomszédos országok operátoraival kötött egyezményekből adódóan egzakt és limitált térerősséértékek betartása szükséges (teljesítmény csökkentés), így a határok mentén is jelentős különbségeket adódhatnak, amennyiben az operátorok különböző lokációkból nyújtanak szolgáltatást [115]. Továbbá előfordulhatnak olyan rendkívüli üzemzavarok, vagy kibertámadások az egyes operátorok hálózatában, amely során felhasználók számára részben vagy egészében ellehetetlenül a mobil

kommunikáció elérhetősége, a kommunikációs teljes elszigeteltsége pedig jelentős kockázatot jelent a felhasználókra nézve. Nagyobb kiterjedésű hálózati hibák vagy kibertámadások esetén tehát a szolgáltatók hálózatainak átívelő network sharing alkalmazási lehetősége szintén érvényt nyerhetne, ugyanakkor lokális szolgáltatáskiesések esetén is releváns lehet a használata.

A mobil szolgáltatók különböző spektrummal, erőforrással és finansziális helyzettel gazdálkodhatnak, valamint eltérő struktúrával és különböző helyszíneken kezdték meg a bázisállomás létesítéseket a mobil távközlés kezdetén, azok pontos elhelyezkedése bizalmas információval ért fel. A 3G hálózatok megjelenésének köszönhetően a 2100 MHz-es sáv használatával a bázisállomások telepítése sűrűbb hálózati struktúrát igényelt, így a szolgáltatók nagyobb arányban kezdték felkeresni és betelepülési engedélyt kérni egymás telephelyeire, mely a 4G országos kiépítésével tovább folytatódott. A 4G országos obligációk (melyről a 2.1-es fejezetben írtam) teljesítése miatt az elmúlt évtizedben tömeges bázisállomás létesítés kezdődött a hazai operátorok hálózatában, mely részben új zöldmezős állomások létesítését, részben a meglévő épületek és objektumokra való betelepülést, részben pedig a szolgáltatók egymás létesítményeinek alkalmazását jelentette. Az elmúlt 15 év fejlesztései során a szolgáltatók egymás objektumait igénybe vették (pl. tornyok) bázisállomáslétesítési céllal. A különbözők technológiák során létesített új állomások dacára még mindig számtalan olyan eset áll fenn, illetve máig léteznek nagy számban olyan települések, amelyeket különböző lokációkból látják el az egyes operátorok. Ezek a helyek az 5G kiépítéshez szükséges új zöldmezős állomások építésével tovább fog nőni. Ilyen helyszíneken a mobilhálózati lefedettség – az egyes szolgáltatóra nézve – jelentős különbségeket mutathat, tehát egy vészhelyzet során is fennállhatnak meghatározó differenciák a lefedettséget, valamint az erőforrásokat (kapacitást) illetően is.

A hazai szolgáltatók központi beállításai szerint a 4G hálózatok prioritást élveznek a legacy technológiákkal szemben (2G/3G), tehát ha egy adott helyen van 4G lefedettség, ott a 4G-s frekvenciasávokra fog hangolni a terminál mindaddig, ameddig a küszöbszinteket el nem éri a lefedettség és minőségi mutatók degradációja. A 4G deep indoor lefedettséget biztosító LTE sávokon (700 MHz, 800 MHz, a későbbiekben 900 MHz) felül kapacitás cellákat is implementálnak az egyre növekvő igények kiszolgálhatósága érdekében (1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz stb.). Az LTE 700 MHz és az 5G kiépítés jelenleg is zajlik a hálózatok modernizációjának keretében, utóbbi technológia egy jelentős hányada egyelőre a 4G sávokban működő DSS-t jelenti (5G technológia, 4G like élménnyel), kisebb része pedig a 3,5 GHz-es frekvenciatartományban megvalósuló valódi 5G performanciára képes ultraszélessávban üzemelő (100 MHz) technológia. Ez a folyamat még sok évig eltart, jelenleg sem az 5G elérhetősége, sem az 5G képes terminálok elterjedtsége nem számottevő. Továbbá az 5G performanciához szükséges spektrum a 3,5 GHz-es sávon áll rendelkezésre, mely tartományban megvalósítható jelterjedés tükrében nem közelíthető meg a 800 MHz-es és 900 MHz-es sávon elérhető lefedettség, sőt megbízható és folytonos beltéri lefedettség sem. Továbbá az 5G esetleges 800 MHz-es vagy 900 MHz-es sávban történő

implementálása esetén a cellák lefedettsége hozzávetőlegesen megegyezik az LTE-n biztosíthatóval. A fentiek tükrében az 5G hálózatokat nem vizsgálom a vészhelyzeti network sharing szempontjából.

A 4G hálózatok lefedettségének legfontosabb spektruma a 800 MHz-es hálózat (országos lefedettséggel bír), ezért a következő szimulációk esetén is az LTE 800-ra, valamint a GSM 900-ra sávra kerül a fókusz. Ugyanakkor a network sharing relevanciája minden elérhető frekvencián üzemelő technológia kapcsán magas (köztük az LTE kapacitás layer-eket). Ennek evidenciája miatt a fejezetben nem térek ki, de röviden összefoglalva az országos és beltéri lefedettségű hálózati réteg vizsgálatát tartom szem előtt, mivel a kapacitás cellák (1800 MHz-től felfele) lefedő cellákkal való (800 MHz, 900 MHz) összehasonlítása egyértelműen azt az eredményt támogatná, hogy a network sharing használatára szükség van, különösképpen olyan esetekben, ahol az egyik szolgáltónak van kiépített LTE 800-as lefedettsége, de egy másik operátor csak LTE 1800-as hálózattal rendelkezik. Az ilyen helyzetekben a vészhelyzeti network sharing alkalmazásával egyértelmű és ugrásszerű lefedettség növekedést lehetséges elérni, az ilyen lehetőségek is hatalmas potenciált jelenthetnek a lefedettségi hálózatmegosztás kapcsán. Ugyanakkor a lefedő hálózatok vizsgálatát tartom legfontosabbnak, mert általánosságban az kijelenthető, hogy a szolgáltatók országos kiépítettsége jó, nem jellemző az 1 kapacitás réteggel való területlefedés (L1800) lefedő cella nélkül (L800). Az említett példa fókuszában olyan szolgáltató hálózata kerülhetne, amely nem rendelkezik az említett lefedő sávban spektrummal (ilyenre találunk példát a hazai operátori palettán is). A lefedettség szempontjából tehát az alsó sáv tartomány a leginkább szignifikáns, a többi kapacitás frekvencia réteg inkább a network sharing kapacitási megfontolásánál hangsúlyosabb (3. fejezet következtetései) olyan szolgáltatók hálózatában, amelyek rendelkeznek LTE 800-as országos lefedettséggel [116][117][118][119][120].

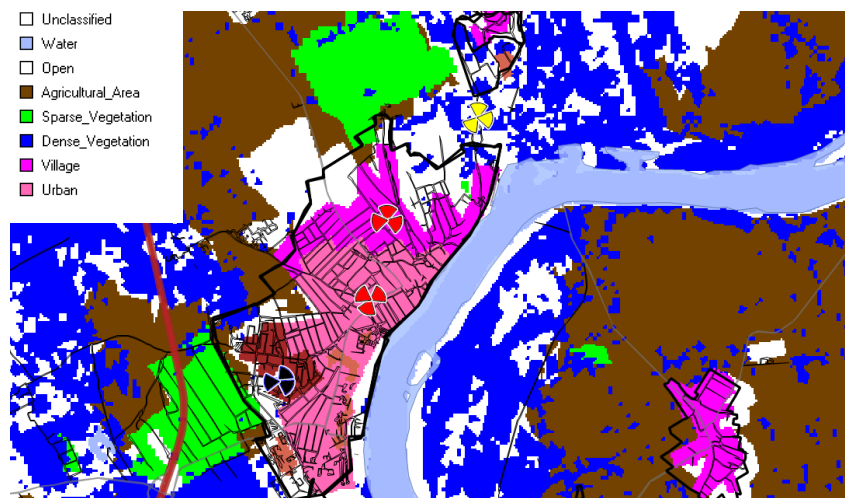
Az alábbiakban egy szimulációs környezetet hozok létre, amellyel meghatározom, hogy milyen lefedettségi és minőségi eredmények érhetőek el az egyes operátorok hálózatában, valamint akkor, ha a hálózati erőforrásaik – lefedettség szempontjából – egyesítésre kerülnek (network sharing) vészhelyzet esetén.

Feltételezem, hogy fennállhat olyan helyszín az országban, ahol a szolgáltatók bázisállomásainak elhelyezkedésének különbségéből adódóan meghatározott helyszínen csak egyik vagy másik szolgáltató hálózata biztosít megfelelő lefedettséget és szolgáltatás minőséget ahhoz, hogy hang és adatkapcsolat formájában azokat igénybe tudják venni egy vészhelyzet során.

4.2.1 Network sharing megfontolásai városi környezetben 2G/4G

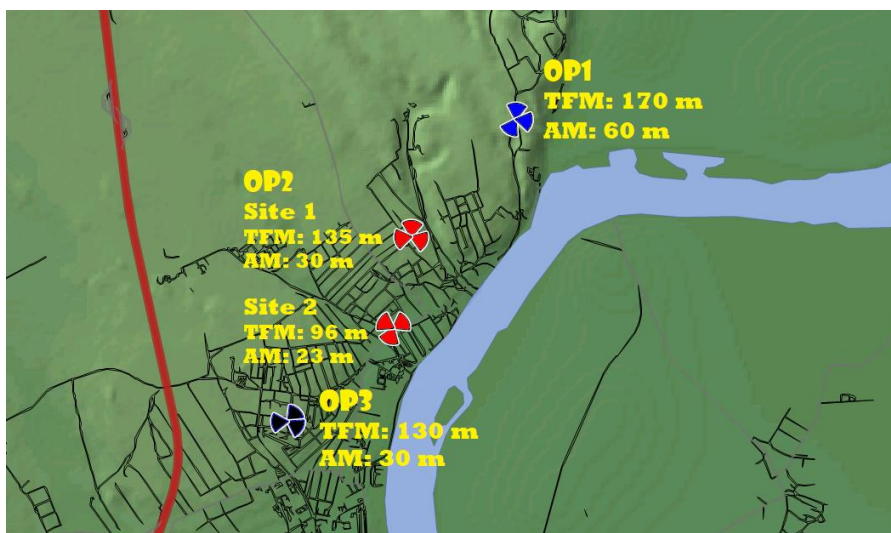
A következő analízishez választott terület kisvárosi környezetben helyezkedik el, melyben a G900-as és L800-as hálózatokat vizsgálom a lefedettségi network sharing relevanciájának szempontjából. A következőkben egy olyan esetet analízállok, amelynél három különböző szolgáltató három különböző helyről látja el az adott kisvárosi települést. A vizsgálati mérésekhez szimulátor segítségét veszem igénybe, a mérési konfiguráció és az egyes operátorok elhelyezkedése a szimuláció számára kreált környezet, de élőhálózati struktúra alapján került megválasztásra, valós képet adva arra a modellezésre

szánt esetre, amely során a szolgáltatók különböző bázisállomásról nyújtanak rádiós szolgáltatást. A kiválasztott területen kertesházás lakóövezet (északi rész), a déli részen pedig városi beépítettség is jellemző épületek találhatóak, a szimulált három operátor bázisállomásait különböző színnel jelöltem (93. ábra).



93. ábra A beépítettség adatbázisa [Forrás: saját szerkesztés]

Az 1-es Operátor (Op.1) jó pozícióból, 170 m-es tengerszint fölötti magasságon épített 60 m-es tornyos állomással a település északi részéről látja el a települést 1 site-al. A 2-es Operátor (Op.2) ezzel szemben 2 site-al fedi le a települést egy az 1-es Operátorhoz képest jóval beljebb elhelyezkedő északi állomással (egy 30 m-es rácsos toronyról, 135 m-es tengerszint fölötti magasságból), valamint egy déli állomással (23 m-es és 96 m-es tengerszint fölötti magassággal rendelkező panelháztetős site-al). A 3-as számú Operátor (Op.3) pedig egy site-al nyújt szolgáltatás a település déli oldalán indított 30 m-es rácsos toronyról (135 m-es tengerszint fölötti magasságból), ez a szolgáltató látja el a települést a legrosszabb pozícióból a három szolgáltató közül, hiszen azonos TFM-el (tengerszint feletti magasság) és torony magassággal rendelkezik (94. ábra, AM-el jelölve – antennamagasság), mint az Op.2. 1-es állomása, ellenben 2 helyett 1 site-al, továbbá egy délebbi a várostól kívül esőbb lokációból. A bázisállomások elhelyezkedéseit és az antennamagasságokat a következő ábrán mutatom be, melyet követően a site-ok közti távolságot a helyszín ortofotójával, valamint a vizsgált terület megjelölésével (95. ábra, **narancssárgával** jelölve a teszterület).



94. ábra A 3 operátoros szimuláció bázisállomás lokációi tengerszint fölötti és antenna magasság megjelölésével. A különböző operátorok különböző szímmel jelölve. Op. 1-3: 1 site - Op.2: 2 site-al látja el a vizsgált települést [Forrás: saját szerkesztés]



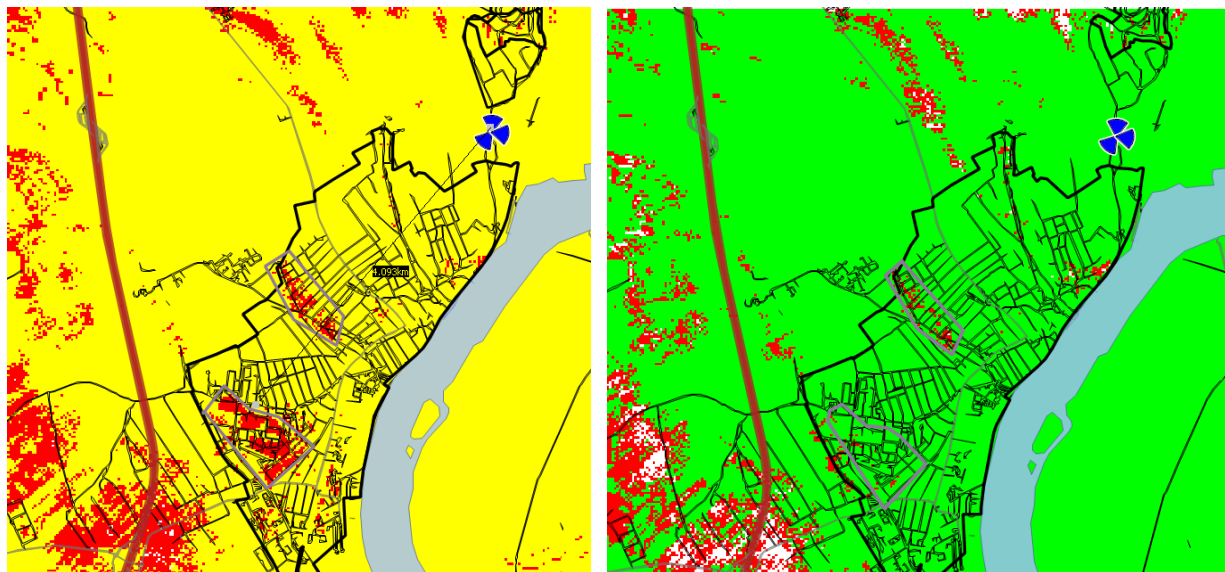
95. ábra Három operátor bázisállomásainak elhelyezkedése különböző lokációkban, az egyes szolgáltatók külön színnel jelölve, narancssárgával bekeretezve a vizsgált (bel)terület [Forrás: saját szerkesztés]

Az első lefedettség vizsgálatot az Op.1 hálózatán mértem, a szimulációban ezen szolgáltató site-ja (fentebb késsel jelölve) egy magaslati pontról (TFM: 170 m) az átlagos toronymagasság dupláján (60 m) kerültek telepítésre az antennák. A város belterületének északi részét az 1-es szektor látja el, a 2-es szektor mezőgazdasági területen biztosítja a rádiós lefedettséget a 3-as (déli szektor) pedig a település nagyobb részét szolgálja ki. A predikciók eredményeinek vizuális megjelenítését ezúttal úgy konfiguráltam be, hogy azok a pontos beltéri jelszintek meghatározása helyett a predikció két állapotot vehet fel (optimális/nem optimális) az adott szolgáltatásra vonatkozólag. A méréseket ugyanúgy beltérre vonatkoztattam.

- GSM: **zölddel** jelölt területeken a hang és adatkapcsolat (EDGE) megléte adott, a **piros** részekben nem létesíthető kapcsolódás ezekre a szolgáltatásokra beltérben; figyelembe vett mutatók: jelszint, bit/hiba arány, RXQUAL;

- LTE: a **sárgával** jelölt részeken a VoLTE megléte adott, a **piros** részeken nem létesíthető kapcsolódás erre a szolgáltatásra beltérben, az adatkapcsolat elérhetőségét külön mutatók segítségével is vizsgálom, vizuálisan viszont a VoLTE-től elkülönítve azt nem jelenítem meg; figyelembe vett mutatók: RSRP, RSRQ, SNR, egyéb indikátor.

Az Op.1 mérési konfigurációja **36. Melléklet**ben található. Elsőként tehát az Op. 1 hálózatára futtatott predikciókat vizsgálom a fent említett szolgáltatások küszöbszintjeinek alkalmazása alapján. Az LTE 800 szerepel elsőként (96. ábra), a GSM 900-ra vonatkozó predikció pedig ezt követően (97. ábra) kerül szemléletesre a lentiekben, a szimulációk a szolgáltatások beltéri elérhetőségére vonatkoznak.



96. ábra Az Op.1 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

97. ábra Az Op.1 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

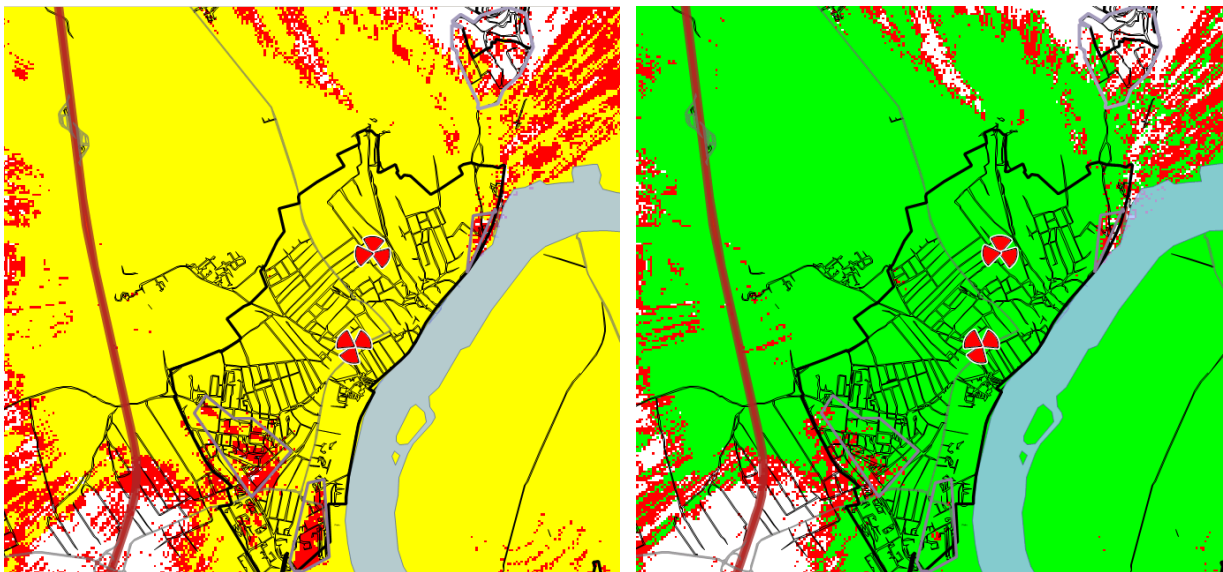
A fenti LTE 800 számítás alapján a település északi része megfelelően ellátott beltéri lefedettséggel, a település déli részein (a predikción **pirossal** jelölve) lokalizálhatóak olyan területek, ahol egy vészhelyzet esetén a VoLTE hívások kezdeményezésére biztosan nem volna lehetőség. Azt, hogy ezeken a helyeken az adatkapcsolat működőképes lehet-e további paraméterek mérésével vizsgálom. A problémás területeket szürkével jelöltem meg, valamint a GSM szimuláción is ugyanezeket a területrészeket vizsgáltam a hálózatok összehasonlítása érdekében. A GSM 900-as predikción a probléma sokkal kevésbé, illetve vélhetőleg a valóságban – egy esetleges vészhelyzeti esemény során – terminál oldalról nem lenne tapasztalható (a technológia, valamint az élőhálózati példánkból adódóan eltérő antennabeállításból adódóan). A fenti predikciók statisztikai eredményeit a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.1) [Forrás: saját szerkesztés]:

Szolgáltató	Carrier	Kategória	VoLTE+Adat „gap”	Adat „gap”
Operator 1 (1 site)	L08 20 MHz	Rossz	6,5 %	A 6,5 %- on belül a terület 5 %-a
		Jó	93,5 %	-
	GSM 900	Rossz	2,3 %	-
		Jó	97,7 %	-

Az 1-es operátor az LTE 800 -as hálózaton a terület 93,5%-át fedi le olyan beltéri lefedettséggel, amellyel vészhelyzet esetén mind a VoLTE, mind pedig adatkapcsolati szándékból igénybevehető volna hálózat. Emellett a belterület 6,5%-n a bajba jutott felhasználóknak nem volna lehetősége a VoLTE kommunikáció kezdeményezésére a hálózaton, mely kritikus jelentőségű egy ilyen helyzetben. A rossz minőségben ellátott terület (belterület 6,5%-ának) 5%-án az adatkapcsolat felvételére sem volna lehetőség a mért paraméter értékekből következtetve erre. A problémás részeket a GSM hálózaton szintén vizsgáltam, amely a terület 2,3%-t érintette. Ez arra enged következtetni, hogy az LTE hálózat alatt ugyan megfelelő adatkapcsolat nem volna biztosított a GSM segítségével (GPRS/EDGE alacsony bit rate), de vészhelyzeti hívás indítására viszont volna lehetőség. Ugyanakkor a kisváros területének 2,3%-n a minőségi paraméterek nem kielégítőek a GSM hálózaton, valamint nem alkalmas vészhelyzeti kommunikáció számára.

A 2-es operátor 2 site-al látja el a várost, jobb beltéri lefedettséget biztosítva ezzel a város belső része számára, ugyanakkor az északi és déli településrész beltéri lefedettsége és minősége még két site-al sem biztosítható egészben. A 2-es szolgáltató hálózatán mind az LTE-n (98. ábra), mind pedig a GSM (99. ábra) hálózaton tapasztalhatóak lefedettségi lyukak, ahol egy vészhelyzet esetén a user-ek képtelenek volnának segítséget hívni, tájékoztatni a külvilágot, esetleg utasításokat kérni a mentési lépések vonatkozásában beszéljünk akár a hang, akár pedig az adatkapcsolat létesítésének sikerességéről. Az Op. 2 esetében a használt antennakonfiguráció a **36. Mellékletben** található.



98. ábra Op.2 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

99. ábra Az Op.2 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés] [Forrás: saját szerkesztés]

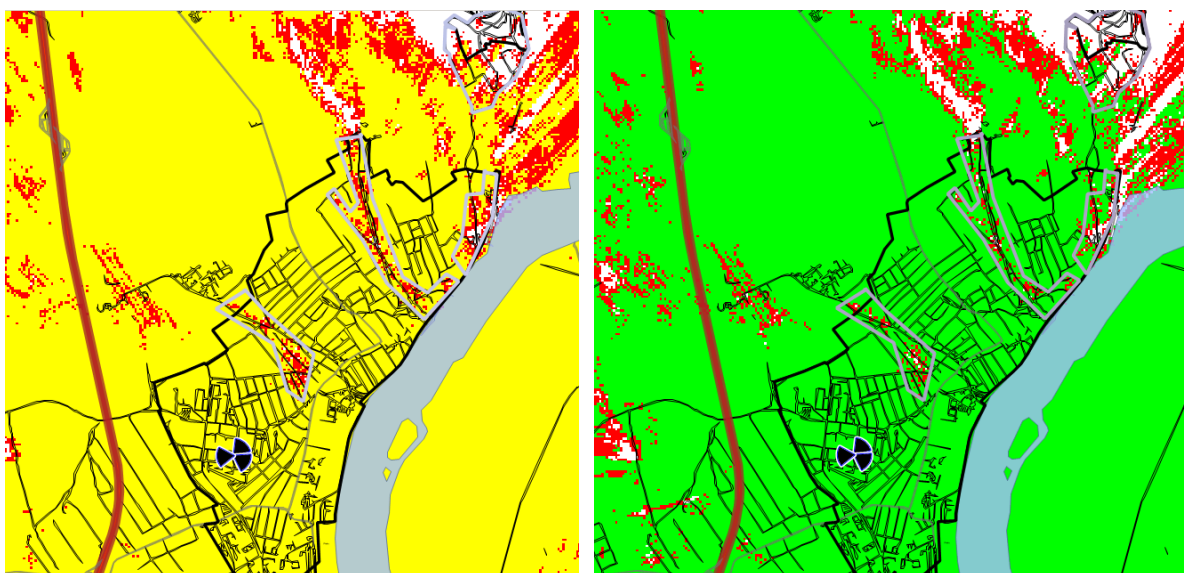
A 2-es Operátor felhasználói a város területének kb. 13%-án nem volnának képesek beltérben vészhelyzeti hívást, ezen terület (12,9%) 40%-án pedig a mért minőségi paraméterek alapján az adatkapcsolat kezdeményezése is ellehetetlenülne az LTE hálózaton beltérben (9. táblázat).

9. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.2):

Szolgáltató	Carrier	Kategória	VoLTE+Adat „gap”	Adat „gap”
Operator 2 (2 site)	L08 20 MHz	Rossz	12,9 %	A 12,9 %- on belül a terület 40 %-a
		Jó	87,1 %	-
	GSM 900	Rossz	9,6 %	-
		Jó	90,4 %	-

A GSM technológián a terület 9,6%-án volt mérhető lefedettség és minőségi probléma, mely során a hang és adatkapcsolat is problémákba ütközhetne. A lefedettség lyukak ugyanazon területre esnek LTE-n és a GSM-en, a GSM hálózaton kisebb arányban mérhető a kritikus részek halmaza a vizsgált szolgáltatások tekintetében.

A 3-as operátor a település déli részéről 1 toronnyal látja el a kisvárost, a pozíció, illetve az effektív antennamagasságból adódóan a mérést megelőzően is várható, hogy a település északi részén jelszint és minőségi problémák adódhatnak a hang és adatszolgáltatásra vonatkozólag egyaránt. Op. 3 mérési elrendezése a **36. Melléklet**ben látható. A predikciók eredményét a 100. ábra és 101. ábra mutatja.



100. ábra Az Op.3 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

101. ábra Az Op.3 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

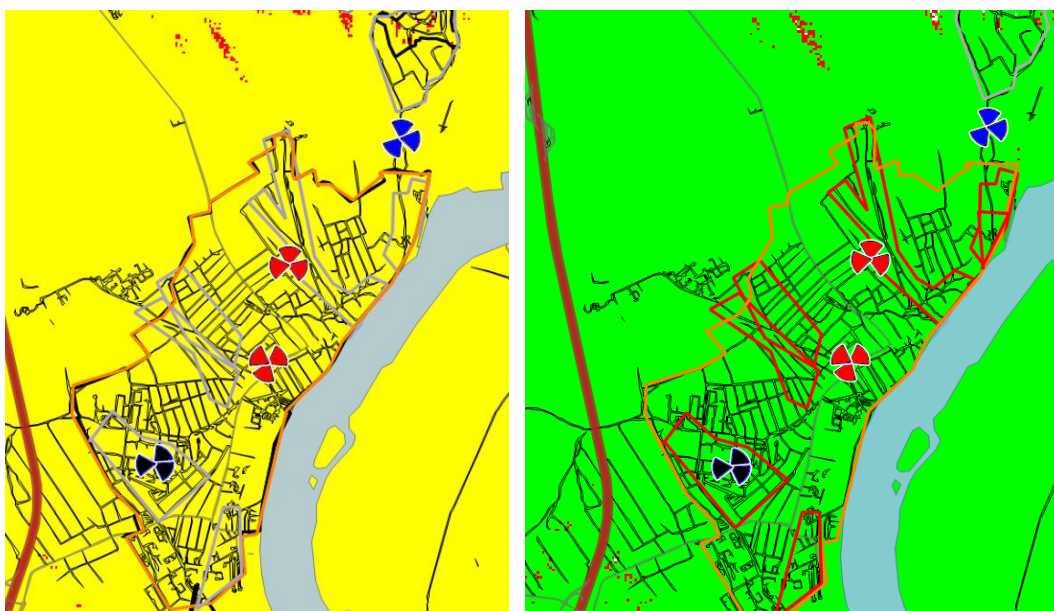
A beltéri lefedettségi problémákat szürkével jelöltem a 3-as operátor hálózatát illetően is, a mérések során hasonló eredményre jutottam, mint a másik két operátor esetén, az LTE hálózat a terület 10,5%-án esett a kritikus szint alá, ahol VoLTE a predikciók szerint nem volna igénybe vehető, az adatkapcsolat pedig ezen terület 31%-án nem volna létesíthető beltérben (10. táblázat).

10. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.3):

Szolgáltató	Carrier	Kategória	VoLTE+Adat „gap”	Adat „gap”
Operator 3 (2 site)	L08 20 MHz	Rossz	10,5 %	A 10,5 %- on belül a terület 31 %-a
		Jó	89,5%	-
	GSM 900	Rossz	9 %	-
		Jó	91 %	-

A GSM hálózaton a belterület 9%-án volna tapasztalható probléma a hívás és adatkezdeményezési próbálkozás vonatkozásában egy vészhelyzet során.

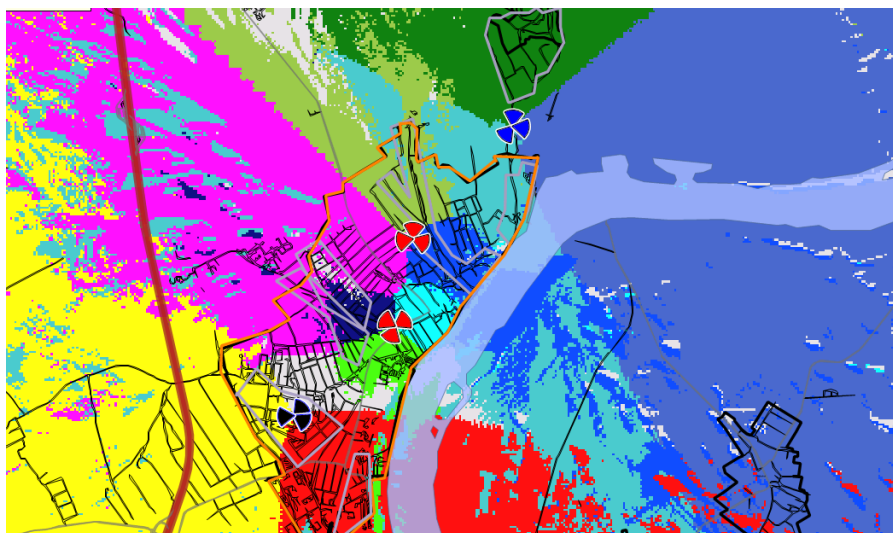
Az utolsó szimulációban azt az esetet elemezem (102. ábra és 103. ábra), amikor a vizsgált példában szereplő három szolgáltató bázisállomásait egy hálózati elemben összepontosul, azaz network sharing formájában egy vészhelyzet esetén mindhárom szolgáltató fogadná egymás felhasználóit, így a vészhelyzet alatt minden erőforrás aggregálásra és a lehető legnagyobb mértékben kihasználásra kerülhetne az igénybe vehető erőforrások és lehetőségek tekintetében.



102. ábra Az Op.1- Op.2 - Op3- LTE 800 -as hálózatának aggregálásával prediktált lefedettsége, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

103. ábra Az Op.1- Op.2 - Op3- GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés] [Forrás: saját szerkesztés]

A fenti predikciók egyértelműen arra lehet következtetni, hogy a három Operátor LTE hálózatának vészhelyzetben való megosztása minden lefedettségi és problémás területet befedne, maximalizálná a vészhelyzeti kommunikáció lehetőségeit. A network sharing bekapcsolását követően a cellahatárok is homogén struktúrát és optimális elrendezést mutatnak (104. ábra).



104. ábra Az Op.1- Op.2 – Op3- LTE 800 -as hálózatának aggregálásával prediktált cellahatáros szimuláció [Forrás: saját szerkesztés]

Mind az LTE, mind pedig a GSM hálózatot illetően közel 100%-ban biztosíthatóvá válik a vizsgált példában a hang és adatszolgáltatás igénybevételének lehetősége (a korábbi kb. 10% -os problémás városrészekhez képest minden szolgáltató hálózatára nézve), az eredményeket a 11. táblázat szemlélteti.

11. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.1-3) [Forrás: saját szerkesztés]:

Szolgáltató	Carrier	Kategória	VoLTE+Adat „gap”	Adat „gap”
Operator 1-2-3 (4site)	L08 20 MHz	Rossz	0,05%	-
		Jó	99,95%	-
	GSM 900	Rossz	0,02%	-
		Jó	99,98%	-

Kisvárosi környezetben az egyes szolgáltatók műtárgyai (bázisállomások) különböző lokációkból eltérő lefedettséget és minőséget tudnak biztosítani kültéri és beltéri lefedettséget illetően. Vészhelyzetek bárhol kialakulhatnak és minden vészhelyzetben életek múlhatnak azon, hogy az érintett user-ek képesek-e információt szerezni hang és adatforgalmazás segítségével, valamint kapcsolatba lépni a vészhelyzeti területen kívüli felhasználókkal vagy a hatóságokkal. Példámban csak egy esetet vázoltam a valóságban lévő számtalan hasonló fellelhető eset mellett. Az analízis során megállapítottam, hogy három különböző szolgáltató hálózatát vizsgálva, beltéri lefedettség és minőségi paraméterek tekintetében operátoronként a terület 6,5 - 10,5 - 12,9 %-án nem volna lehetséges a VoLTE hanghívás kezdeményezni, és ezeken a problémás területek 5 - 40 %-án az adatkapcsolat sem volna létesíthető. A GSM hálózatok esetén ez a mutató 2,3 % - 9,6 % között alakult, ahol sem hang sem pedig adatkapcsolat nem létesíthető. Megállapítható tehát, hogy az LTE-n tapasztalható lefedettség lyukak egy részét a GSM hálózat fedezi, ugyanakkor pl. az adatszolgáltatás egyáltalán nem kiváltható az elavult EDGE technológiával. Összeségében a példában tehát kb. 10% -os lefedettség veszteség éri a vészhelyzeti kommunikációban résztvevőket amiatt, hogy kizárólag a honos szolgáltatójuk hálózatát képesek igénybe venni.

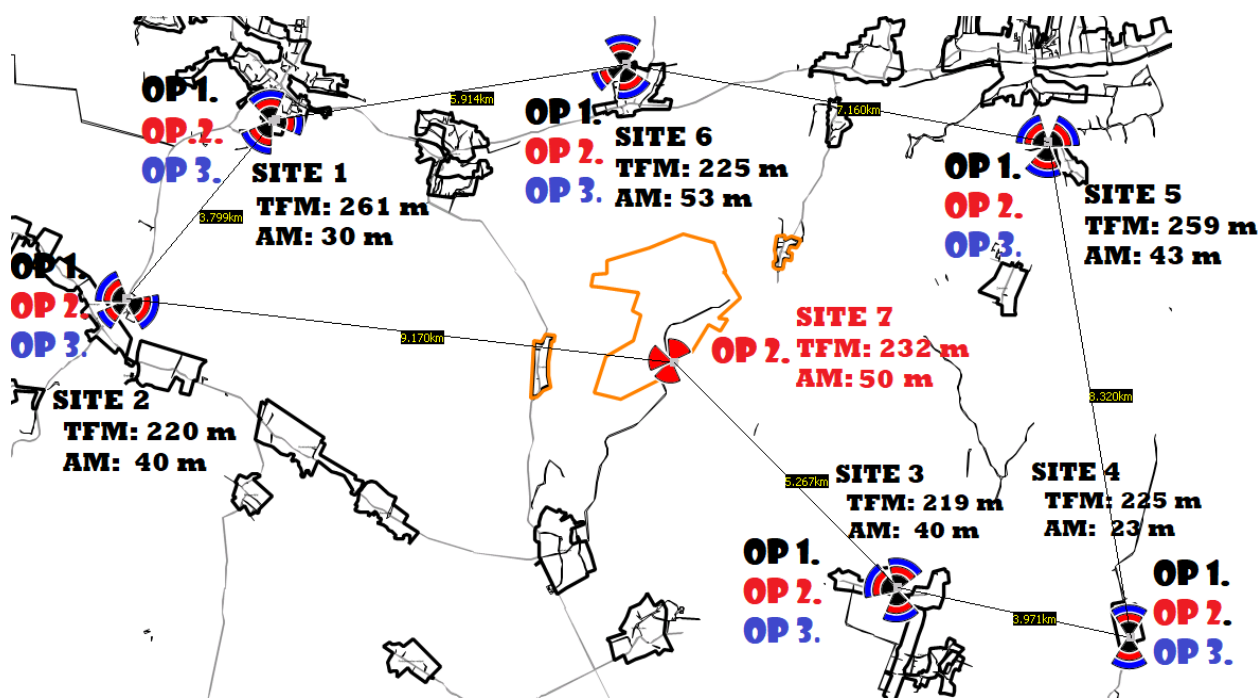
Az adott települést ellátó bázisállomás fizikai helye sokszor nem csak a rádiós tervező szempontok alapján kerül kivitelezésre, hanem annak tükrében is, hogy hol lehetséges azt létesíteni az adott települési

önkormányzat vagy HÉSZ jóváhagyásával. Az elmúlt évtizedek során ezek a szabályzatok is folyamatosan formálódnak, így különböző időpontban különböző szolgáltatók más-más helyszínekre települtek. A bázisállomástól távolodva a cellahatárok felé közelítve a lefedettség és minőség egyre romlik, így a vészhelyzeti kommunikáció szempontjából ezeken a helyeken a társszolgáltatók bázisállomásának és hálózatának igénybevétele kritikus jelentőségű a felhasználók számára. A külföldi user-ek (amennyiben roaming partnerség áll fenn több szolgáltatóval) akár manuálisan kiválaszthatják a lefedettség és minőség szempontjából kívánatos hálózatot, így a vendég felhasználók teoretikus értelemben a fenti példában szereplő mindhárom szolgáltató teljes lefedettségét igénybe tudják venni mind a GSM, mind pedig az LTE hálózatot illetően. A hazai ügyfelek számára viszont ez nem valósulhat meg, így azok a felhasználók, akik a lefedettség szempontjából problémás helyszíneken tartózkodnak a honos operátoruk hálózatán, azok nem fognak tudni kommunikációt létesíteni (hang és adatkapcsolat formájában), Ők kizárólag a 112-es segélyhívót fogják tudni használni (szolgáltató független). Ugyanakkor az elemzésből arra is fény derült, hogy amennyiben egy vészhelyzet során a szolgáltatók hálózatai (vagy legalább a lefedő layer-ek L800 és G900 érintettségével) lefedettség szempontjából aggregálásra kerülhetnének, úgy azokon a helyszíneken, ahol különböző műtárgyakról kerül ellátásra az adott település, ott jelentős javulást lehetne elérni e tekintetben, példában az operátorspecifikus lefedettségi és minőségi gap-ek mindegyike megoldódna. Ehhez egy olyan network sharing fejlesztésre volna szükség, mely során amennyiben vészhelyzet áll fenn, úgy a szolgáltatók a felhasználókat felengednék egymás hálózatára. Ennek jelentősége vészhelyzet esetén felbecsülhetetlen jelentőségű lehet, hiszen emberéletek múlnak azon, hogy a felhasználók képesek-e a hang és adathálózat használatára, ez által információt szerezni és segítséget kérni az adott vészhelyzet vonatkozásában.

4.2.2 Network sharing megfontolásai vidéki környezetben 2G/4G

Ebben a fejezetben a vészhelyzeti network sharing városon kívüli, vidéki környezetben való létjogosultságát szeretném vizsgálni, egy az élőhálózati példából vett eset szimulálásán, mérésén és elemzésén keresztül. Ahogyan azt az előző fejezetpontokban vizsgáltam városi környezetben a kiesett bázisállomások viszonylag jó eséllyel (de nem egészen és nem teljeskörűen) át tudják venni egymás kiszolgálási területét egy esetleges vészhelyzet estén, biztosítva ezzel a folyamatos vészhelyzeti kommunikációt. Egy-egy bázisállomás megsemmisülése vagy kiesése vidéki környezetben már sokkal rosszabb eredményeket produkált vizsgált szimulációk során [121]. Ilyen esetekben is nagy jelentősége és relevanciája lehet a szolgáltatók közti network sharing-nek, illetve, amennyiben az egyes szolgáltatók az adott települések ellátását különböző lokációkból látják el, vagy ha az egyik operátor hálózata kibertámadásból vagy egyéb problémából adódóan kiesik a vészhelyzeti esemény során. Ennek tükrében, ha a vészhelyzet olyan területet érint, ahol nem megfelelő a lefedettsége az adott szolgáltatónak, úgy annak felhasználói nem lesznek képesek a vészhelyzeti kommunikáció lebonyolítására. A következőkben a vidéki területeken vizsgálom a network sharing relevanciáját egy választott példa analízisén keresztül.

A következő vizsgált esetben vidéki környezetben folytatok szimulációkat. Annak ellenére, hogy országos átlagban nagyobb arányban találunk olyan eseteket, ahol a szolgáltatók közös műtárgyról nyújtanak rádiós szolgáltatást, még mindig találhatóak olyan esetek országszerte, ahol a szolgáltatók különböző helyszínről látják el az adott lokációt. Amennyiben az operátorok azonos helyszínről biztosítják a vészhelyzethez szükséges szolgáltatást, úgy a szimulációban azonos antennairányokat és kb. azonos antennakonfigurációkat feltételezek, mely hálózattervezői aspektusokat figyelembe véve fedi a valós mérnöki megfontolásokat (révén, hogy az ellátandó települések azonos irányba helyezkednek el). A következő szimuláció bázisállomásainak elhelyezkedését a 105. ábra mutatja be, a különböző színnel jelölt cellák, eltérő szolgáltatókat jelölnek. Az analízis alá vett területet **narancssárgával** jelöltem, mely településeket a szolgáltatók azonos lokációkból látnak el. Ez alól kivétel a csak **piros** celákkal jelölt szolgáltató tornya, amely egyedüli operátorként van jelen és látja el a vizsgált területet az annak közelében épített 50 m-es rácsos toronytól, ez a szimulált szolgáltató ugyanakkor a többi állomáson is jelen van. A következő vizsgálat arra kíván rávilágítani, hogy egy vészhelyzeti esemény során (a **kijelölt területen**) milyen különbségek adódhatnak a szolgáltatók eltérő helyszíneinek használatára vonatkozólag, valamint, hogy a network sharing-nek van-e relevanciája vidéki környezetben is, mennyiben segíthetné egy ilyen technikai megoldás a vészhelyzeti kommunikációt havaria helyzetben.

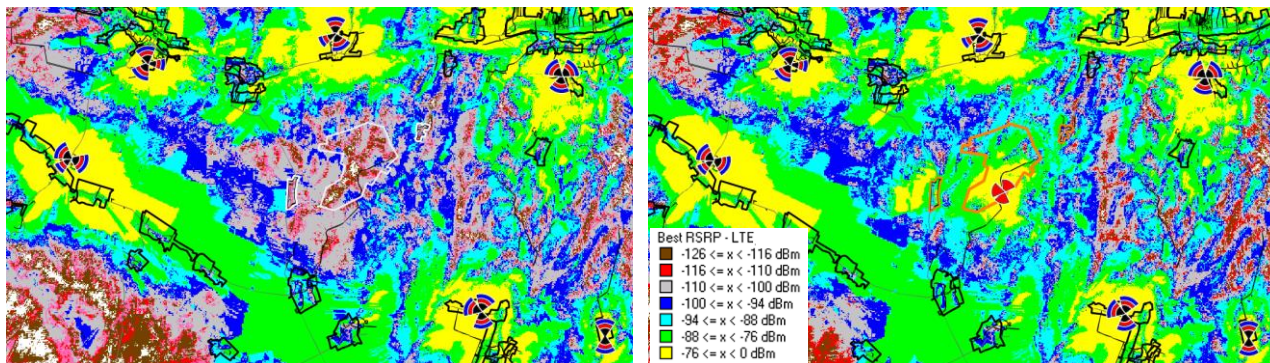


105. ábra A szolgáltatók bázisállomás lokációinak elhelyezkedése, 3 színnel jelölve a különböző szolgáltatók helyszínei és cellái, középen található a piros szolgáltató azon site-ja, melyen egyedül nyújt szolgáltatást a narancssárgával jelölt, vizsgálni kívánt területen [Forrás: saját szerkesztés]

A bázisállomásokhoz használt hardveres konfigurációkat **37. Mellékletben** részletezem.

A lenti első melléklet RSRP predikción az látható (106. ábra és 107. ábra), hogy a 1-es és 3-as Operátor (**fekete** és **kékkel** jelzett cellákkal) vizsgált vészhelyzeti területre jutó jelszintjei gyengék, a települések belterületében elvárt jelszintektől az jóval elmaradottabb, a terület kb. 30%-ban bizonytalan a beltéri lefedettség, tehát láthatóan gyengén lefedettek a **narancssárgával** megjelölt települések. A szimulációban

mért jelszintek 20%-a -116 dBm alatti értékeket vett fel, a legerősebb vett jelszint a terület 8%-án volt mérhető, ez -94 és -100 dBm közötti értékek felelt meg (a mérési eredményeket **38. Mellékletben** mellékelem).

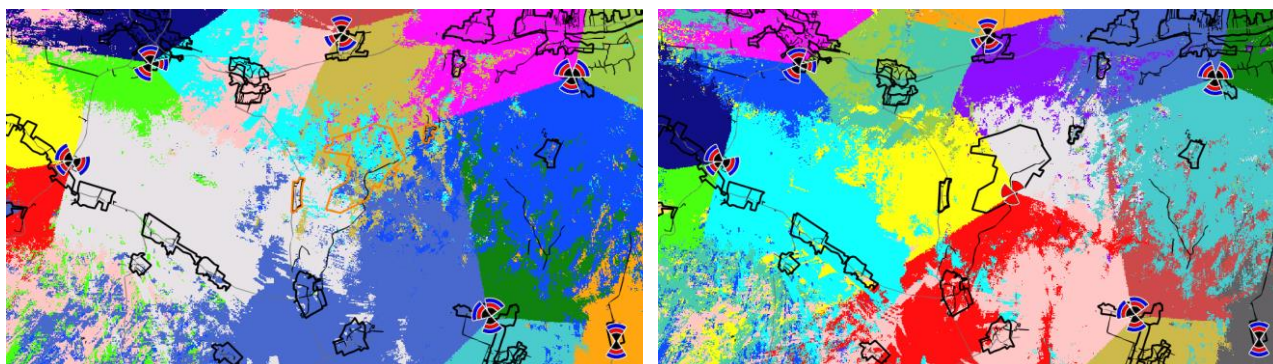


106. ábra RSRP predikció a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

107. ábra RSRP predikció a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

A 2-es számú operátor (**pirossal** jelzett cellák) az 1-es és 3-as Operátor (**feketével** és **kékkel** jelzett cellák) minden bázisállomásán jelen van. A 1-es és 3-as szolgáltató által nem betelepült 50 m-es toronyról biztosított jó lefedettséget szemlélteti a 107. ábra a 2-es számú Operátor hálózatának vonatkozásában, amivel megfelelő jelszinttel látja el a vizsgált településeket (teszterület **narancssárggával** jelölve). A 2-es Operátor ezzel tulajdonképpen mindenhol (99%-ban) megfelelő beltéri jelszintet biztosít a vészhelyzet sújtotta terület számára), minden mért kategória az optimális tartományban maradt (a végeredmény statisztikái a **38. Mellékletben** látható). Az 1-es és 3-as Operátor szemszögéből a terület rosszul ellátott (106. ábra, a teszterület **fehérrel** kiemelve)

A cellahatáros predikciók is megerősítik a fenti állításokat, az analízis alá vett településekre több cella szór / lát be / szemetel, melyek kis jelszinttel, az interferenciából adódóan rossz jel/zaj viszonytal szolgálják ki az adott területet (108. ábra). Ellenben már a cellák határainak meghatározásával is bebizonyosodik, hogy jó minőségű és optimális szolgáltatást nyújt a vészhelyzetben érintett területen a 2-es számú Operátor bázisállomása (109. ábra).

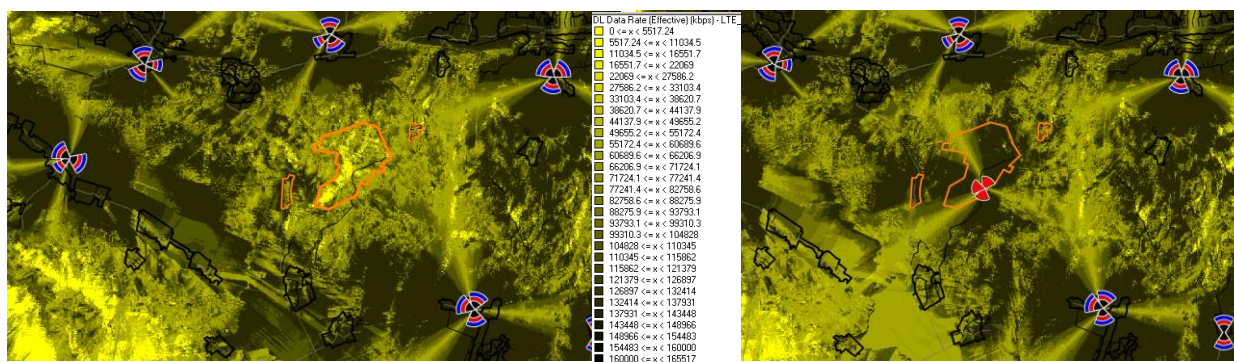


108. ábra Cellahatáros predikció 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt operátorok tekintetében (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

109. ábra Cellahatáros predikció a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató tekintetében (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

Az RSRQ paramétereket mérve és vizsgálva szintén kijelenthető, hogy a 2-es Operátor által létesített tornyos állomásra nem betelepült szolgáltatók nem képesek megfelelő jelszinttel és minőséggel ellátni a vészhelyzet sújtotta területet, a vizsgált terület kb. 57%-ban mértem optimális szintet a 1-es és 3-as (kékkel és feketével jelölt) Operátor hálózatában, míg a 2-es operátor (pirossal jelölt cellák) hálózatában ez 95%, mely óriási különbség. A RSRQ vizuális alakulását a **39. Melléklet**en szemléltetem.

Az vészhelyzet során tapasztalható teoretikus maximális adatátviteli sebességek prognosztizálható módon az 1-es és 3-as Operátor hálózatában a rossz jel/zaj viszony, valamint jelszintnek köszönhetően kritikus (110. ábra). A terület 18%-án 5 Mbps alá esett a mért minták sebessége (teoretikus peak terheletlen hálózaton), ez az érték a bal és jobb oldalú kis településrész (szintén **narancssárga** jelölés) esetén javult csak kis mértékben a mérés szerint. Ugyanakkor a 2-es Operátor hálózatában robosztus és magas adatátviteli sebességeket mértem (111. ábra), a cellahatároktól eltekintve a vészhelyzeti felhasználók által tapasztalható adatátviteli sebességek több részén közel a maximális 150 Mbps körül alakultak, illetve a terület 18%-án 100 Mbps körüli értékeket mértem (terheletlen hálózaton), ami szemlélteti a sharing/nem sharing közti óriási különbséget.



110. ábra THP predikció a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

111. ábra THP predikció a 2-es szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

Ebben a fejezetpontban külön a hang és adatszolgáltatást statisztikai elérhetőségét nem vizsgálom, valamint a GSM hálózat alakulását sem, mivel a fenti eredmények egyértelműen rávilágítottak a szolgáltatók bázisállomás-lokációinak eltéréseiből adódó különbségekre, melyből következtethetőek a vészhelyzeti alkalmazás aspektusai is.

A vidéki területek vizsgálata a network sharing vészhelyzeti alkalmazhatóságának relevanciáját illetően a következő konklúziókra jutottam. Azon eshetőségek során, amikor egy operátor olyan bázisállomással rendelkezik, ahol a többi szolgáltató nincs betelepülve, úgy a területet érintő vészhelyzet esetén jelentős különbségek adódhatnak a hálózatok között. Az élőhálózati példák alapján összeállított konfigurációk mentén lefolytatott szimulációk és mérések bizonyították, hogy lehetséges olyan helyzet, ahol az egyes szolgáltatók lokációinak eltéréseiből – egy esetleges vészhelyzet esetén – akár 30%-ban teljesen elbizonytalanodna a szolgáltatás minősége a gyenge lefedettség és minőségi paraméterek miatt. Ellenben a 2-es szolgáltató individuális bázisállomásának használata, azaz az 1-es és 3-as Operátor ügyfeleire is

kiterjesztett vészhelyzeti network sharing alkalmazásával közel 99%-ban biztosíthatóvá vált volna az LTE hálózat megfelelő jelszinttel való elérhetősége, mely mind a hang, mind pedig az adatkapcsolat lebonyolítására alkalmassá tenné a hálózatokat. Mindezek mellett az RSRQ mérésekből következtethetünk arra, hogy a vészhelyzetre kijelölt terület közel 57%-ban biztosított csak az optimális minőség, 43%-ban pedig szuboptimálisnak bizonyult, míg a 2-es Operátor bázisállomásának sharing-jével ez 97%-ra ugrana fel. A szimulációk rámutattak arra, hogy az 1-es és a 3-as Operátor a vészhelyzeti területet gyenge jelszinttel, rossz minőségben, a településrészeket cellahatárokon „pattogatva” volna képes (részben) kiszolgálni. A terület kb. 18%-ban az elvi maximális adatátviteli sebesség 5 Mbps alá esne, mely olyan kis kapacitás jelent a valóságban, ami nem képes egy vészhelyzeti forgalmat megfelelően kezelni, ugyanakkor a 2-es Operátor plusz bázisállomásának vészhelyzeti sharing-je esetén robosztus és optimális adatátviteli sebesség volna biztosítható vészhelyzeti felhasználók számára [50].

A vidéki területek vészhelyzeti network sharing-je egyértelműen segítené, hogy a vészhelyzet sújtotta terület felhasználóit a lehető legjobb minőségben és lefedettséggel fogadják a hálózatok. Bizonyos helyzetek a fenti eredményeknél nagyobb arányú növekményt is hozhatnak, ilyen lehet pl. a szolgáltatók hálózatában bekövetkezett jelentős üzemzavar esetére alkalmazott hálózatmegosztás is. Bebizonyosodott tehát, hogy a network sharing-nek mind a városi, mind pedig vidéki környezetben van relevanciája vészhelyzet esetén.

4.3 Következtetések

Az értekezés 4. fejezetében vizsgáltam, hogy milyen lefedettségvesztési és minőségi következményekkel jár, amennyiben a vészhelyzeti eseményből adódóan egy bázisállomása szolgáltatása kiesik.

A szimulációk rávilágítottak arra, hogy nagyvárosi környezetben a kieső bázisállomás kiszolgálási területét a környező bázisállomások cellái képesek lehetnek átvenni és megfelelő jelszint mellett tovább biztosítani a szolgáltatást. Továbbá megállapítható, hogy már egyetlen bázisállomás kiesése jelentős térerősség és minőségi degradációt jelent, valamint a kiesett kapacitási erőforrás miatt ezek a mutatók terhelt hálózaton tovább romlanak. A környező állomások a beltéri VoLTE szolgáltatást nem biztos, hogy maradéktalanul képesek biztosítani, valamint bizonyos részeken az elérhető adatletöltési sebességek is olyannyira lecsökkenhetnek, hogy magas hálózati terheltség esetén a vészhívások sikertelenségén felül az adatforgalmazás kezdeményezése is problémákba ütközhet az LTE hálózaton. A GSM bázisállomás kiesése is számottevő lefedettségcsökkenést jelentett nagyvárosi beépítettség mellett, ellenben a környező bázisállomások megfelelő jelszinttel képesek voltak átvenni a kiesett cellák kiszolgálási területét, így a következtetések szerint a GSM bázisállomás kiesése az esetek többségében vélhetően nem okozna problémát városi környezetben ott, ahol a bázisállomás lekapcsolását megelőzően is volt jó beltéri lefedettség.

A vidéki környezetben szimulált vészhelyzeti szituáció vizsgálata során a nagyvárosi környezettől eltérő eredményekre jutottam. A kieső bázisállomás nélkül a vizsgált településen jelentős lefedettségvesztés

következett be, a szomszédos települések nem voltak képesek mindenhol megfelelő jelszinttel és minőséggel átvenni a kieső bázisállomás területét, így csak részben tudták biztosítani a szolgáltatás meglétét. A szimulációk alapján a lekapcsolást követő legkritikusabb településrészekben a beltéri hangszolgáltatás és adatkapcsolat indításának sikeressége kétségesnek bizonyult, ugyanakkor a kültéri predikciók azt mutatták, hogy az adatforgalmazásra vélhetően van lehetőség, ellenben a vészhelyzeti szituáció által okozott és emelkedett forgalmat a hálózat nem képes kezelni a lekapcsolt állomás nélkül. Az analízis továbbá rávilágított arra is, hogy a GSM hálózat valószínűleg képes lett volna biztosítani a 4G alatti hangszolgáltatást a települést kiszolgáló bázisállomás kiesését követően.

Kisvárosi környezetben az egyes szolgáltatók bázisállomásai különböző lefedettséget és minőséget képesek biztosítani. Az alkalmazott szimuláció rámutatott arra, hogy a lefedettség és minőség problémák különböző helyeken merülnek fel eltérő bázisállomás helyszín és antennakonfiguráció használata esetén. A különböző operátorok lefedettség és minőség problémás helyszínei közel megegyeztek az LTE és a GSM hálózat vonatkozásában, ugyanakkor az LTE-n jelentősebb lefedettségdegradáció volt tapasztalható a VoLTE és adatszolgáltatás tekintetében, míg a GSM hálózat nagyobb arányban volt képes hangszolgáltatást biztosítani a vizsgált területeken. Azokban a pozíciókban, ahol mindkét hálózat gyengén teljesített, ott jellemzően egy másik szimulált operátor megfelelő szolgáltatást nyújtott. Összeségében az analízis rávilágított arra, hogy a három szolgáltató hálózatának vészhelyzeti megosztása a lefedettségi és minőségi gap-ek közel mindegyikére megoldást jelentene.

A vidéki területeken vizsgált sharing vészhelyzeti alkalmazhatóságát illetően a következő konklúziókra jutottam. A vidéki területeken lefolytatott szimulációk során drasztikus javulást mértem a jelszint, a minőségi paraméterek, valamint az adatátviteli sebességek tekintetében. A vidéki területek network sharing vizsgálata is megerősítette azt, hogy az operátorok eltérő helyszínről való szolgáltatása jelentős eltéréseket mutat, valamint bebizonyította, hogy a vidéki területek vészhelyzeti lefedettség megosztása egyértelműen segítségül szolgálna annak érdekében, hogy felhasználók a lehető legjobb minőségben és lefedettséggel kerüljenek ellátásra a vészhelyzeti kommunikáció vonatkozásában.

Bebizonyosodott tehát, hogy a network sharing-nek mind városi, mind pedig vidéki környezetben van relevanciája vészhelyzet esetén, valamint, hogy a szolgáltatók közti hálózatmegosztás alkalmazásával nagy arányú lefedettség és minőségjavulást érhetünk el legyen szó akár az operátorok konfigurációs beállításairól, akár a bázisállomás elhelyezkedéséből adódó különbségekről, vagy hálózati sérülésekről. A fejezetben a terjedelem korlátok miatt néhány fontosabb esetet szimuláltam, a bizonyítást ezen felül számtalan élőhálózati példával lehetne még alátámasztani és a bemutatott példánál jóval nagyobb potenciál rejlik az alkalmazásában. Gondoljunk például azokra az esetekre, ha egy szolgáltató nem rendelkezik LTE 800-as hálózattal az adott helyszínen (pl. kizárólag csak LTE 1800-al), de bizonyos operátorok viszont igen, úgy ilyen esetben is óriási lefedettség növekedést érhetünk el a network sharing-el anélkül, hogy a hálózatot kiépítenénk az operátor hálózatában. A módszer továbbá jól alkalmazható lenne nagyobb kiterjedésű szolgáltatói hálózatkiegészések esetén, vagy kisebb, csak egyes szolgáltatót érintő

lokális kiesések kapcsán, amelyek során a felhasználók átterelésre kerülnének egy szolgáltatást biztosítani képes operátor hálózatára, ha a honos szolgáltató hálózatában üzemzavar áll fenn. Az elvégzett esettanulmányok arra világítottak rá, hogy a network sharing lefedettségi alkalmazása minden esetben pozitívan befolyásolná a vészhelyzeti kommunikáció elérhetőségének sikerességét.

A network sharing lehetősége a vízióim szerint kizárólag vészhelyzetben kerülne aktiválásra. A sharing lefedettségi szempontból való vészhelyzeti alkalmazása a felhasználóra nézve akkor kerülne bekapcsolásra, ha az igénybe vett (honos) operátor hálózatának jelszintje és minősége nem optimális a vészhelyzeti kommunikáció lebonyolításához a mobil terminálok által végzett mérések alapján. A terminál így arra az operátorra csatlakozhatna, amelynek van megfelelő lefedettsége és a szolgáltatás minősége is optimális. Ezzel a technikával válna biztosíthatóvá a lehetséges legkiterjedtebb országos lefedettség a vészhelyzeti kommunikáció tekintetében.

A lefedettségi network sharing technikai megvalósítását egy későbbi kutatási célként jelölöm meg. A kutatás első vizsgálandó aspektusaként az eSIM témában való alkalmazhatóságát emelném ki, melynek segítségével a mobil terminál akár több operátor hálózatához is hozzáférhet, igénybe veheti azt, valamint a fent leírt szempontoknak megfelelően végezhet méréseket.

5 VÉSZHELYZETI BÁZISÁLLOMÁSOKRA VONATKOZÓ SZABÁLYOZÁSI KÉRDÉSEK

5.1 Problémafelvetés

A korábbi fejezetekben részletesen kifejtettem és vizsgáltam, hogy a mobil hálózatok vészhelyzeti alkalmazásakor milyen problémák merülhetnek fel, legyen az frekvenciatervezéssel, lefedettséggel vagy kapacitással kapcsolatos témakör. A következőkben szeretném összefoglalni az eddigi eredményeimet és felvezetni a záró témakört.

A különböző szolgáltatók rádiós fejlesztései jelentős különbségeket mutatnak a megvalósítás helyét és időzítését illetően (a különböző technológiák és frekvencia layer-ek implementálása tekintetében). Az ügyfélszámosság, illetve a felhasználók adott településen való eloszlása differenciális, különböző módon alakulnak az egyes szolgáltatókra nézve, melynek fényében az LTE kapacitás frekvenciasávok integrálása is különböző helyeken és időpontban kerülnek megvalósításra. A hálózatmodernizációs fejlesztések is különböző ütemezés és menetrend szerint zajlanak (az országban található több ezer bázisállomást illetően), mely szintén növeli az operátorok hálózatai közti performanciás különbséget. Ebből adódóan bizonyos bázisállomásokon akár 2 - 6 (700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2600 MHz) LTE réteg is üzemelhet, míg más állomások pl. csak 1 vagy 2 frekvenciasávon rendelkeznek LTE-vel (800 MHz + 1800 MHz vagy 2600 MHz) [49][122][123].

Az egyik taglalt aspektus tehát a kapacitást érintő különbségek, melynek köszönhetően míg egyes szolgáltatók hálózatát torlódás érheti vészhelyzetben (ügyfélszámosság és a kapacitásból adódó

különbségek miatt), addig más hálózatok képesek lehetnek kiszolgálni a vészhelyzetben forgalmazni kívánt felhasználókat. Erre a problémára 2-es fejezetben ismertetett tézisemben vázolt megoldás bevezetésével javasoltam megoldást hozni, melynek keretében a szolgáltatók Core hálózatai összekapcsolásra kerülnének, valamint a helyszínen elérhető összes szolgáltató minden technológiáját és erőforrását egybe vetve volna lehetőség a vészhelyzeti forgalom egyenletes elosztására az ún. load balancer funkció bevezetésével. A forgalomelosztó rendszer felelne azért, hogy az operátorok hálózatai és technológiai között a felhasználók aránya és a vészhelyzetből kialakult forgalom mindig homogén eloszlású legyen, minimalizálva ezzel a torlódás esélyét és maximalizálva a hálózatok elérhetőségének sikerességi arányát a hang és adatszolgáltatás tekintetében [84][124].

A másik figyelembe vett szempont pedig a különböző szolgáltatók eltérő objektumról és lokációkból való ellátására tevődik vissza, mely eshetőségeit az előző fejezetben szintén vizsgáltam (3-as fejezet). Az eltérő bázisállomás lokációkból lefedettségi különbségek adódnak a szolgáltatók között, továbbá a vészhelyzetben érintett területeket különböző rádiós konfigurációkkal (antennairányok és beállítások, antennamagasság stb.) látják el, amelyek számottevő differenciát eredményezhetnek a vészhelyzeti kommunikáció során. A fentiek felül előfordulhatnak jelentős üzemzavarok, amelyek esetén a működő szolgáltatók a kiesett operátor felhasználóinak forgalmát kezelni tudnák. A fenti aspektusokat szintén vizsgáltam a hálózatok közti network sharing lefedettségi szempontból történő relevanciájára vonatkozólag. Ezzel a megoldással tehát a szolgáltatók felhasználói egymás hálózatát igénybe vehetnék, kizárva ezzel a lehetőséget, hogy a vészhelyzeti kommunikáció esetleg meghiúsulhasson ott, ahol a honos operátorának nincs megfelelő lefedettsége vagy nem képes az optimális szolgáltatás minőség biztosítására.

A fentiekben részletezett analízisek és az ebből adódó következtetések új tudományos eredményekre (javasolt megoldások további kutatási céllal) megszülettek, azonban értekezésemben egy olyan problémával még nem foglalkoztam mélyebben, mely a vészhelyzetek többségét érint(het)i. A vészhelyzetek bárhol kialakulhatnak, gondolok itt pl. a természeti katasztrófákra vagy háborús eseményekre, amelyek ott is megtörténhetnek, ahol nincs mobilhálózati kiépítettség és lefedettség. Ilyen helyzetek megoldására az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások szolgálnak, mely állomásokat pl. a nagyobb tömegrendezvények ellátására is használnak. Az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomások tehát a rádiós lefedettség hiánya miatt vagy a kapacitásproblémák kezelésére kerülnek alkalmazásra a szolgáltatás elérhetőségének helyreállítása érdekében. Mindkét megfontolás érvényesült pl. a 2013-as magyarországi árvizek kapcsán, amely során a katasztrófavédelem mentési helyszínei rendszerint olyan területeken zajlott, ahol nem volt megfelelő lefedettség vagy kapacitás. Továbbá indokolt lehet a telepítésük bármilyen nemzetbiztonságú érintettségű esemény kapcsán is, vagy ahol a meglévő hálózatokat meg kell erősíteni lefedettségi, minőségi vagy kapacitásbeli megfontolásból.

Ebben a fejezetben a jelenlegi magyar jogszabályi háttérrel vizsgálom abból a szempontból, hogy a szolgáltatóknak vészhelyzetben a rádiós hozzáférési hálózat (RAN) működésére és az ad-hoc telepítésű

mobil bázisállomások vonatkozásában van-e valamilyen jogszabályi kötelezettsége. Ha bizonyítást nyer, hogy nincs, úgy szeretném azt vizsgálni, hogy kidolgozható-e olyan szempontrendszer, amely alapkövűl szolgálhatna egy jövőbeli jogszabály alkotási javaslatnak, és amelyet a magyar jogrendszerbe integrálva biztosíthatóvá válna a mobil hálózatok vészhelyzetben történő folyamatos üzemelése.

5.2 Magyar jogszabályi környezet a mobil hálózatokra vonatkozólag

2008/114/EK az európai kritikus infrastruktúrák azonosításáról és kijelöléséről, valamint védelmük javítása szükségességének értékeléséről szóló irányelv magyar implementációja a 2012. évi CLXVI. törvény (Lrtv.), melynek célja a létfontosságú rendszerelemek beazonosítása, azok kijelölése, a teljes körű védelem kialakítása, valamint az üzemfolytonosság biztosítása. A törvény továbbá definiálja az alapvető fogalmakat, rendelkezik a nemzeti és európai létfontosságú rendszerelemek kijelöléséről, az üzemeltetői biztonsági terv készítésének kötelezettségéről, biztonsági összekötő személy delegálásáról, valamint a nyilvántartás és ellenőrzés szabályairól és szankcionálásáról [34].

Az EU-s irányelvek magyar jogrendbe történő lefektetése alapján a kritikus infrastruktúrák nemzeti létfontosságú rendszerelemmé történő minősítése az érintett eljárás lefolytatásának keretein belül zajlik, mely során azonosításra kerül az adott nemzeti vagy európai létfontosságú rendszerelem (attól függően, hogy csak Magyarországot vagy több Tagállamra érintő rendszerelemről beszélünk). Az ágazati kormányrendeletben kijelölt ágazati kijelölő hatóság (ágazatonként más és más) vizsgálja az ún. horizontális és ágazati kritériumok teljesülését az adott kritikus infrastruktúrára vonatkozólag, melyet követően szükség esetén kezdeményezik a nemzeti vagy európai létfontosságú rendszerelemmé történő kijelölését (valamint a kritériumok teljesülése esetén az alapvető szolgáltatásokat nyújtó szereplők közé felvételt). A folyamatot a katasztrófavédelmi szervek koordinálják. 5 évenként történik a fentiek felülvizsgálata komplex ellenőrzés keretében. A témában következő jogszabályok vonatkoznak a kritikus infrastruktúrákra:

- 2012. évi CLXVI. törvény ((Lrtv.): a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről [125];
- 65/2013. (III.8. - Lrtv. Vhr.) Korm. Rendeletet: a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról [126];
- 249/2017. (IX. 5.) Korm. Rendelet: az infokommunikációs technológiák ágazathoz kapcsolódó létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről [127];
- 2013. évi L. törvény (Ibtv.): az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról [128];
- 187/2015. (VII. 13.) Korm. Rendelet: az elektronikus információs rendszerek biztonsági felügyeletét ellátó hatóságok, valamint az információbiztonsági felügyelő feladat- és hatásköréről, továbbá a zárt célú elektronikus információs rendszerek meghatározásáról [129];

- 271/2018. (XII. 20.) Korm. Rendelet: az eseménykezelő központok feladat- és hatásköréről, valamint a biztonsági események kezelésének és műszaki vizsgálatának, továbbá a sérülékenység vizsgálat lefolytatásának szabályairól [130];
- 41/2015. (VII. 15.) Belügyminisztériumi rendelet: az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról szóló 2013. évi L. törvényben meghatározott technológiai biztonsági, valamint a biztonságos információs eszközökre, termékekre, továbbá a biztonsági osztályba és biztonsági szintbe sorolásra vonatkozó követelményekről [34][131]

A fent említett kritikus infrastruktúrákkal kapcsolatos összes magyar jogszabályt és kormányrendeletet áttekintettem, valamint feldolgoztam annak érdekében, hogy az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomásokra vonatkozó szabályozási kritériumokat megismerjem és áttanulmányozhassam.

Továbbá vizsgáltam a 2003. évi az elektronikus hírközléssel kapcsolatos törvényt, valamint a 17/2020, a mobil rádiótelefon szolgáltatást nyújtó elektronikus hírközlési szolgáltatók és a hivatásos katasztrófavédelmi szerv központi szerve közötti együttműködés rendjéről szóló kormányrendeletet [132][133].

Szintén kapcsolódik a témához az Európai Tanács által publikált 2018/1972 Irányelv, Az Európai Elektronikus Hírközlési Kódex létrehozásáról, melynek magyarországi átültetése is lezajlott 2021-es évben [134].

A 4/2016. NMHH, az informatikai és elektronikus hírközlési, továbbá a postai ágazat ügyeleti rendszeréről, valamint a szolgáltatók bejelentési és kapcsolattartási kötelezettségeiről szóló rendeletét is áttekintettem, amelyben meghatározásra kerül, hogy a szolgáltatóknak milyen rendkívüli esetekben van bejelentési kötelezettségük (az NMHH felé).

5.3 Megállapítások

Az előző fejezetekben áttekintettem a magyar jogrendben megtalálható törvényeket és kormányrendeleteket, a kritikus infrastruktúrák és annak védelmére vonatkozó szabályozásokat, továbbá a mobil hálózatokkal kapcsolatos hírközlésre vonatkozó előírásokat. A vizsgálat során egyetlen törvényben és kormányrendeletben sem találtam információt, illetve iránymutatást arra vonatkozólag, hogy egy esetleges vészhelyzetben a mobil bázisállomások kiesése esetén a szolgáltatóknak milyen feladatai, kötelezettségei és teendői vannak annak érdekében, hogy a mobil szolgáltatást helyreállítsák. A vészhelyzeti állomások létesítésére vonatkozó szempontok egyikét sem szabályozzák a vizsgált törvények és kormányrendeletek, ahogyan azon eseteket sem, ha a szolgáltatás eleve nem biztosított egy adott területen, vagy ha olyan nemzetbiztonsági kockázatot jelentő esemény történik, amely során a szolgáltatás biztosítása elengedhetetlen (ad-hoc telepítésű mobil bázisállomás segítségével). A vizsgált jogszabályokban és kormányrendeletekben nem találtam támpontot arra vonatkozólag sem, hogy a szolgáltatóknak milyen teendőik vagy vállalásai volnának a bázisállomások üzemzavara vagy sérülése esetén annak helyreállítására vonatkozólag.

A kritikus infrastruktúrákra vonatkozó jogszabályok tekintetében a mobilhálózatok vészhelyzeti szabályozására a 249/2017-es ágazati kormányrendeletben történik kapcsolódás, mely az infokommunikációs technológiákról, valamint az ágazaton belüli mobil hang és adatszolgáltatásról szól. Ez alapján az minősül vészhelyzeti (rendkívüli) eseménynek, amennyiben a létesítményen, az eszközökön vagy berendezéseken olyan mértékű meghibásodás következik be, hogy az a szolgáltatással ellátott terület minimum 30%-át érinti és várhatóan 4 órát meghaladó időtartamban degradálja. Továbbá olyan esemény is ilyen minősítés alá kerül, amely a szolgáltatás minőségének jelentős romlását okozza, azaz a hívás sikerességi arány – 2 órát meghaladóan – a megelőző év átlagához képest 35%-t esik, vagy ha az a szolgáltatás folytonosságához szükséges feltételek leállításához / az alaptevékenység átalakításához vezet [127].

A 65/2013. (III. 8.) kormányrendelet, a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról rendelkezik, amelynek 2. melléklete tartalmazza a kritikus infrastruktúrákra vonatkozó üzembiztonsági terv tartalmi és formai követelményeit. Az üzembiztonsági terv tartalmi előírásait áttekintve arra jutottam, hogy az részletesen bekér minden információt az adott nemzeti vagy európai létfontosságú rendszerlemről, valamint a helyreállításra vonatkozó szabályokat is lefekteti. Továbbá az üzembiztonsági tervek részleteiben tartalmaznak információt az adott rendszerlemről, köztük az adott humánerőforrás igényre vonatkozó leírással és egyéb a rendszerlemre vonatkozó kötelezettségekről [126].

Ellenben a 249/2017 számú, az Infokommunikációs technológiákról szóló kormányrendeletben bemutatott horizontális és ágazati kritériumrendszer szerint csak olyan rendszerlemek kerülnek a nemzeti vagy európai létfontosságú rendszerlemmé való kijelölés folyamata alá, amelyek meghibásodása esetén tömeges ellátási problémákat jelentenének. Ágazati kritérium pl., hogy több, mint 20 ezer felhasználót kell, hogy érintsen az adott hálózati elem meghibásodása. Amennyiben a nemzeti létfontosságú rendszerlemmé történő kijelölés nem valósul meg, azaz az adott technológia nem kerül a kritikus infrastruktúrák minősítése alá, úgy sem az üzembiztonsági terv készítésének kötelezettsége, sem pedig a katasztrófa helyreállítási terv előállításának szükséglete nem áll fenn. Számos a mobil hálózatokat kiszolgáló rendszerlemet illetően teljesülnek a jogszabályokban előírt ágazati (249/2017. Kormányrendelet) és horizontális kritériumok (65/2013. Kormányrendelet), így a Core, IP és Transzport hálózati elemeinek egy része nemzeti létfontosságú rendszerlemnek minősül. Ilyenek pl. a MSC, BSC, DWDM, IP/MPLS, Data Center központok, valamint egyéb Gerinchálózati csomópontok is. A rádiós hozzáférési hálózat bázisállomásai egyenként azonban nem tartoznak a kritikus infrastruktúrák nemzeti létfontosságú rendszerlemé történő kijelölés folyamata alá, mert nem teljesítik az előírt horizontális és ágazati kritériumokat. Ennek tükrében az üzemeltetőknek sem üzembiztonsági tervet, sem pedig katasztrófa helyreállítási tervet nem szükséges készíteni a bázisállomások vonatkozásában, továbbá a vészhelyzeti ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások kérdésköre sem került szabályozás alá [126][127].

A 2003. évi elektronikus hírközlésről szóló törvényt és a 17/2020 a mobil rádiótelefon szolgáltatást nyújtó elektronikus hírközlési szolgáltatók és a hivatásos katasztrófavédelmi szerv központi szerve közötti együttműködés rendjéről szóló kormányrendeletet is elemeztem a vészhelyzeti alkalmazásról szóló passzusok után kutatva. A törvény kiter az arra, hogy a mobil szolgáltatást nyújtó elektronikus hírközlési szolgáltató a lakosság riasztását és veszélyhelyzeti tájékoztatását, továbbá ezen információk célba juttatását SMS útján végzi el. Az erre vonatkozó legfrissebb szabályozás a 217/2020. (V. 21.) kormányrendelet, mely meghatározza a 2003-as törvényben megfogalmazott rendszer kiépítésének körülményeit, a hálózatok kapcsolódási pontjait, a tesztüzem feltételeit, a rendszer kiépítésének határidejét, a Belügyminisztérium és az adott Szolgáltató hálózata közti biztonságos kommunikáció módját, valamint a lakosság riasztásának és veszélyhelyzeti tájékoztatásának szabályait [132][133]. A hírközlési törvény és a vonatkozó részre íródott kormányrendelet a (3.1-os fejezetben ismertetett PWS) – vészhelyzeti SMS küldő rendszer – magyarországi kiépítésével foglalkozik (mely rendszer azóta már bevezetésre került és jelenleg is üzemel), egyéb aspektusokra nem tér ki.

2018/1972-es európai elektronikus hírközlési kódex létrehozásáról szóló irányelv (melynek magyarországi átültetése is lezajlott a 2021-es évben) szintén szabályozza a vészhelyzeti SMS küldő rendszer kiépítésének kötelezettségeit az EU tagállamaiban, továbbá előírja, hogy szolgáltatók kötelesek mindent elkövetni a hálózatok és szolgáltatások biztonságának garantálásáért, az üzletmenetfolytonosság-menedzsment tekintetében pedig elkészíteni a szolgáltatás folytonosságát szolgáló stratégiai és vészhelyzeti terveket, valamint maximalizálni a katasztrófa elhárítási képességeket [134].

A fentiek felül a 4/2016. NMHH, az informatikai és elektronikus hírközlési, továbbá a postai ágazat ügyeleti rendszeréről, valamint a szolgáltatók bejelentési és kapcsolattartási kötelezettségeiről szóló rendelete ír elő haladéktalan bejelentési kötelezettséget az NMHH felé katasztrófa vagy rendkívüli esemény során a mobil hálózatok vonatkozásában, mely szintén csak a bázisállomás által lefedett dimenzióan nagyobb egységekre vonatkozik. A teljes igénye nélkül pl. olyan esetben állnak fenn a fentiek, amikor a mobil rádiótelefon szolgáltatás minőségének jelentős romlását okozó esemény történik, és a hívások legalább 25 százalékában a hívásfelépülés meghiúsulását, a hívások legalább 25 százalékában a hívás megszakadását eredményezi [135];

Egy esetleges kiterjedt vészhelyzet során hatalmas károkat jelenthet az, amennyiben a szükséges rádiós lefedettség (és/vagy kapacitás) hiányzik a vészhelyzet sújtotta területen. Ennek fényében megítélésem szerint nemzetbiztonsági kockázatot jelenthet, amennyiben semmilyen jogszabály nem rendelkezik a mobil szolgáltatók lefedettségi és kapacitásjavítási kötelezettségeiről. Amennyiben a szolgáltatás a vészhelyzeti eseményből adódóan megszűnne vagy egyébként sem volt elérhető lefedettség a veszélyhelyzet sújtotta területen, úgy az operátorok anélkül teljesítik kötelezettségeiket, hogy azt egyébként törvény előírná és a folyamat lépéseit definiálná legyen szó hibaelhárításról vagy ad-hoc telepítésű mobil bázisállomással történő szolgáltatás helyreállításról. Meglátásom szerint olyan meghatározásra volna szükség, mely egyértelműen definiálja azokat a kötelezettségeket, amelyek ilyen

helyzetben előírják az operátorok számára a teendő szükséges lépéseket és határidőket, mely iránymutatásként szolgálhat a feladat során. Elengedhetetlennek tartom az ideiglenes vészhelyzeti állomások létesítési szempontjainak és annak szabályozásának magyar jogrendbe történő beépítését, így a fejezetben szeretném az ennek alapjául szolgáló lépéseket megalkotni.

A fejezetben szeretném a jogszabályi hiányosságokat lefedni, valamint a fent említett aspektusokra egy átfogó és iránymutató szempontrendszert nyújtani, amely egyértelműen definiálná az operátorok vészhelyzeti eljárásrendjét, valamint lefektetné a mobil szolgáltatók kötelezettségeit az ad-hoc telepítésű mobil állomásokra vonatkozólag. A cél az volna, hogy a bázisállomások sérülése, illetve az adott terület lefedettségi vagy kapacitásbeli problémái jogszabályi keretek mentén kerüljenek ellensúlyozásra annak érdekében, hogy a vészhelyzeti területen a mobil szolgáltatás a körülmények ellenére folyamatosan biztosítva legyen. Azokat a problémákat, amelyek a szolgáltatás üzemzavarból adódnak és az ezzel kapcsolatos hibaelhárítási időkre vonatkoznak nem vizsgálom, a fejezetben kizárólag az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások szabályozási környezetére fókuszálok, ugyanakkor véleményem szerint a bázisállomásokra vonatkozó hibaelhárítási időket is érdemes volna a jogszabályi környezet megalkotásával revideálni és lefektetni.

A gyakorlatban a mobil szolgáltatók a jogszabályi kötelezettségektől függetlenül is törekednek a vészhelyzeti események kapcsán az érintett területek mielőbbi rádiós ellátására mind a GSM, mind pedig az LTE hálózat vonatkozásában. A témakör jelentős nemzetbiztonsági kapcsolódása (emberéletek múlhatnak a vészhelyzeti kommunikáció elérhetőségén) miatt meglátásom szerint szükséges volna, hogy egy egységes és iránymutató szempontrendszer alapján jogszabályi keretek közé kerüljön lefektetésre a témakör.

5.4 Mobil szolgáltatókra vonatkozó vészhelyzeti szempontrendszer megalkotása

Az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti állomások szabályozását kétféleképpen látom megvalósíthatónak. Az egyik megoldás szerint az ágazati és horizontális kritériumok teljesülése nélkül is szükséges volna a nemzeti létfontosságú rendszerelemmé történő kijelölést kiterjeszteni a bázisállomásokra vonatkozólag (jelenleg legalább egy ágazati és egy horizontális kritérium megléte a feltétel, melyet a bázisállomások elkülönülve nem teljesítenek). Továbbá az üzembiztonsági és katasztrófa helyreállítási terv megkövetelésén túl az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti mobil állomások lenti, általam megalkotott speciális szempontrendszerrel való kiegészítését is szükségesnek találom megvalósítani a jogszabály keretein belül annak érdekében, hogy az ilyen állomásokra jellemző specifikus tényezők egyértelműen meghatározásra kerülhessenek. A másik lehetséges megoldás az új törvényben vagy meglévő jogszabály módosításával való jogalkotás. A szempontrendszert és az alapvető követeléseket a hazai operátorokkal való egyeztetéseket követően és együttműködésben lehet megalkotni annak érdekében, hogy megvalósítható ambíciók születhessenek. A szempontrendszer ajánlásként szolgálhat az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások jogszabályi környezetének megalkotásához.

Első körben szeretném definiálni azokat a releváns tényezőket, amelyek bemeneti, induló adatként szolgálnak az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomások telepítésére vonatkozólag. A lenti szempontrendszer a létesítési folyamat keretein belül minden szolgáltatóra külön érvényes és értendő.

1. A szükséges input adatok szempontjai

A feltételezett jogszabálynak a vészhelyzeti mobil bázisállomások vonatkozásában első körben definiálnia szükséges a problémakört, tehát a legfontosabb bemeneti adatok rendelkezésre bocsátását. Az input adatokat a katasztrófavédelem juttathatja el a mobil szolgáltatók részére, megnyitva ezzel az adott (hiba)jegyet. Elsők között definiálni kell, hogy mi a hálózati probléma jellege: lefedettség probléma (hang vagy adatszolgáltatás hiánya, problémája), kapacitás hiány (pl. torlódás, szolgáltatás kimaradás stb.). Egy rendkívüli esemény kapcsán meg kell határozni, hogy a vészhelyzet pontosan hol helyezkedik el (koordináta), mi a pontos kiterjedése (rádiusz vagy km^2 -ben kifejezve) – műholdas képen is jelölve, eljuttatva azt a szolgáltatók részére. Amennyiben a terület nem egy pontban, hanem több helyszínre összpontosul, úgy feltétlen jelölni szükséges az ellátandó területeket a műholdas térképen, illetve amennyiben rendelkezésre áll, úgy helyszíni fotókat is mellékelni kell annak érdekében, hogy a szolgáltatók megfelelő számú bázisállomással készülhessenek, valamint ennek megfelelően tervezhessék meg az ideiglenes hálózatot. Ezen felül, a mobilhálózat kapacitásának megválasztása szempontjából rendkívül fontos információ, hogy az adott vészhelyzeti eseményhez mérten milyen felhasználószámra szükséges méretezni az ideiglenes állomást, mely alapján az adott szolgáltató következtethet a saját hálózatára becsült ügyfélszámra és ennek megfelelően megválaszthatja az installálandó konfigurációt. Releváns továbbá, hogy az adott vészhelyzet számára a hangszolgáltatás biztosítására vagy pedig adatkapcsolatra is szükség van-e. Az alap konfiguráció része kell legyen, hogy mindkét szolgáltatás biztosítsák (hang és adat), ugyanakkor, ha valamilyen indokból a hangszolgáltatás nyújtása elegendőnek bizonyulna, úgy kevésbé komplex konfigurációkkal és beállításokkal készülhetnek az operátorok (pl. 4G nélküli 2G hálózat implementációja). Továbbá fontos információ, hogy mi a vészhelyzeti esemény várható időbeli kiterjedése, illetve, hogy mennyi ideig kell az ideiglenes állomásnak üzemben lennie. Az input adatok meghatározása mindig az Országos Katasztrófavédelemtől vagy a Belügyminisztériumtól kell, hogy érkezzen, amely szerv illetékes a vészhelyzet elrendelésére, valamint a vészhelyzeti terület kijelölésére.

2. Elméleti technikai, tervezési szempontok

Elméleti technikai kérdéseket a tervezési szempontok jelentik, mely a bemeneti adatok alapján történik. Ennek során a begyűjtött adatok és helyszínről érkező információk segítségével asztal mellől megtörténik a bázisállomás rádiós lefedettségének és kapacitásának megtervezése szimulátor programok segítségével, melyekkel az élő hálózat (minden technológián és frekvencián) szimulálásra kerülhet és ennek segítségével bővíthető és tervezhető új bázisállomás a meglévő struktúrába illesztve (mind cellatervezési mind pedig frekvenciatervezési szempontból). A szimulátor segítségével lehetséges elvégezni a lefedettségi vizsgálatokat, valamint méretezni a kapacitást. Ezzel párhuzamosan az élő hálózat

(amennyiben van lefedettség a vészhelyzeti helyszínen) forgalmát vizsgálják meg, hogy legyen átfogó kép a kapacitás kurrens állapotáról, és az finomhangolásra kerülhessen. A folyamatok megtörténtével születhet meg a válasz az Országos Katasztrófavédelem vagy a Belügyminisztérium vészhelyzeti elrendelésére, miszerint valóban szükséges-e az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomással való hálózaterősítés, és ha igen, akkor milyen konfiguráció mellett. Ugyanígy történik az átviteltechnikai tervezés, mely során szintén szimulátor segítségével prediktálják a várható átlátást a mikrohullámú állomások között (vagy az optikai bekötés lehetőségét). Továbbá a bázisállomás áramforráshoz való csatlakoztatási lehetősége is vizsgálatra kerül, melyet követően előáll a szükséges rádiós és átviteltechnikai konfiguráció. Ennek összesítése és adatlapra fektetése adja meg a szükséges berendezések, eszközök és alkatrészek sorát és ez alapján készülhet a beruházási és kivitelezői terv (költségek meghatározása, esetlegesen a kivitelező vagy külsős partner megbízása), amely alapján a fizikai és logikai eszközök összeépítése definiálásra, valamint az implementációs projekt megvalósításra kerülhet.

3. Logisztikai szempontok

A következő fontos pont a logisztikai és implementációs technikai kérdések tisztázása. A logisztikai kérdéskört illetően több témakör érintett. Ilyen például a mobil bázisállomás és elemeinek a helyszínre szállítása: a rádiós hardverek (BBU), a rádiós erősítők (RRU), megfelelő hosszúságú és mennyiségű optikai kábelek (BBU és RRU közti összeköttetés), az RRU és az antennát összekötő jumper kábelek, az antennák és egyéb felszerelési alkatrészek (antennarögzítő kit és eszközök, csavarok stb.), az átviteltechnikai hardverek (mikrohullámú vagy optikai bekötésnek megfelelően), valamint az tápellátáshoz szükséges berendezések.

4. Logikai implementáció szempontjai

A logikai implementáció jellegű kérdések között felmerül az átviteltechnikai bekötések lehetőségei, azaz, hogy az átviteltechnikai bekötés megoldható-e. Amennyiben belátható távolságban van optikai átjátszóállomás, úgy az optikai bekötés a legkézenfekvőbb megoldás. Minden egyéb esetben mikrohullámú berendezéssel lehetséges a központhoz csatlakoztatni a bázisállomást, melyhez átlátást szükséges elérni a szomszédos mikrohullámú átjátszóállomás felé, amit a felállított tartóeszköz (mely általában 30 - 40 m-es maximális magasságot vehet fel) tetején elhelyezett mikrohullámú berendezéssel kell biztosítani. Amennyiben ez nem megoldható, úgy a bázisállomás bekötése nem megoldott, lehetőség van ad-hoc mobil mikrohullámú átjátszóállomás felállítására, melyre már a jel egy hoppal beköthető a központba, de ez költséges és komplex megoldás. Műholdas kapcsolatot a bázisállomások bekötésére Magyarországon (annak költsége és kis adatátviteli sebessége, valamint nagy késleltetése miatt) nem vesznek igénybe, ugyanakkor a műholdas bekötés sávszélessége csak a 2G hálózat számára biztosítana elegendő erőforrást. A műholdas átviteltechnika a jövőben nagyobb hangsúlyra tehet szert a SpaceX Starlink projektjének köszönhetően (melyet a 1.4.1 fejezetpontban tárgyaltam) [38]. Amennyiben a bázisállomás átviteltechnikai útja adott, úgy elvégezhető a bekötés és az indítandó rádiós cellák logikai

felkonfigurálása központi, valamint végponti oldalról. A leírtakon felül kulcskérdés még, hogy a bázisállomás energiaigényét milyen forrásból lehet biztosítani. Amennyiben ez nem garantálható a vészhelyzeti helyszínen, úgy az áramot aggregátorról is lehet biztosítani az üzemanyag folyamatos pótlása mellett. Az eszközök tápellátásának redundanciáját diesel generátorral, valamint akkumulátorok segítségével lehet biztosítani [136].

5. Fizikai implementáció üzembe helyezési szempontok

A következő szempont a fizikai implementáció és az üzembe helyezés, melyet megelőzően már a tartóeszköz, a tápellátás és eszközei, az átviteltechnikai és rádiós eszközök berendezései már biztosítottak, valamint azok a központi oldalról logikailag is bekonfigurálásra kerültek (a BBU-ig). A beüzemelés során a kapcsolódások fizikailag is megtörténnek, a BBU és az RRU közti összeköttetés kiépül (optikai kábel), az antennák és az RRU közti koaxiális kábel is bekötésre kerül. Az antennák megfelelő irányszögben és meghatározott mechanikus és elektronikus dőléssel a tartóárbócra rögzítésre kerülnek, melyet követően megtörténhet az árbóc felengedése a kívánt magasságba (általában elektronikusan vezérelt teleszkópok segítségével). Az árbócot természetesen más helyszíni objektum is kiválthatja, például egy megfelelő magasságú és adottságú épület az ellátandó területen (vagy bármilyen más tartóeszköz), amelyekre az antennák felszerelhetők (ilyen esetben egyéb típusú antennatartó eszközök kerülnek alkalmazásra). A fentiek felül ebben a fázisban megtörténik a tápellátás fizikai bekötése, és áramkimaradás esetére (backup scenárió) implementálásra kerülnek a szükséges aggregátorok és akkumulátorok. Az üzembe helyezést követően a rádiós cellák a megfelelően beállított antennakarakterisztika szerint megkezdik működésüket [137].

6. Üzemeltetési szempontok

Az üzembe helyezést követően az üzemeltetési feltételeket szükséges figyelembe venni. Az üzemeltetés fontos aspektusa a bázisállomás (hardverek és eszközök) megfelelő helyen való „tárolása”, mely történhet a teherautó belső terében kialakított speciálisan raktérben vagy a helyszínen szállított kültéri rádiós szekrény alkalmazásával. A hardvereket védeni kell az időjárás viszontagságaitól, valamint állandó szobahőmérsékletet igényelnek. A hőmérséklet beállítása minden esetben klímaberendezéssel történik, akár a teherautó belső teréről, akár speciális rádiós kültéri szekrényről beszélünk. Utóbbi általában abban az esetben kerül alkalmazásra, ha az antennák épületre vagy egyéb tartóelemre kerülnek felszerelésre. Az üzemeltetési szempontok közé tartoznak a rádiós cellák üzemeltetésével összefüggő KPI-k folyamatos monitorozása (azon központi paraméterek, melyek közvetlenül reprezentálják a cellák optimális működését – pl. hálózat elérhetőségének sikerességi aránya), illetve a hibaelhárítás, amennyiben bármilyen üzemfolytonosságot érintő anomália lépne fel, továbbá a bázisállomás tápellátás folyamatos biztosítása, áramkimaradás esetén a diesel generátorok és akkumulátorok üzembe helyezése.

7. Fizikai biztonságtechnikai szempontok

Mindezeket követően a fizikai biztonságtechnikai szempontokat érdemes megfontolni, tehát a bázisállomás fizikai védelmét. Ez mechanikai és elektronikai védelmi eszközökkel, valamint tűzjelző

berendezések telepítésével történik [138][139]. Az ad-hoc telepítésű mobil bázisállomásokhoz minden esetben alkalmaznak mechanikai védelmet mobil kerítés formájában. A bázisállomás speciális kulcsokkal közelíthető meg minden esetben (kültéri szekrény vagy speciális teherautó), továbbá elektronikus védelem céljából biztonsági kamerákat telepítenek, amennyiben annak feltételei adottak. Kártyás beléptető terminál alkalmazására is van lehetőség, amely közvetlenül a hálózatfelügyeleti központba (NOC) kerül bekötésre, monitorozhatóvá téve ezzel a helységbe belépő személyeket. Minden esetben szükséges biztonsági szolgálat alkalmazása is, mely az ideiglenes állomás a 0-24 órás őrzését biztosítja [140][141][142].

8. Humán erőforrással kapcsolatos szempontok

A következő témakör a humán erőforrások szempontjai. Az – individuális bázisállomásokra nem obligát – üzembiztonsági tervekben az adott rendszerelem rendeltetésszerű működéséhez szükséges, hogy a humán erőforrások és betöltött munkakörök meg legyenek nevezve (szakértő-, felügyeleti-, üzemeltető mérnök stb.). Véleményem szerint a kritikus infrastruktúrák üzembiztonsági tervében meghatározott pozíciómegnevezésen túl a megalkotandó jogszabályban érdemes volna a szükséges pozíciókat is meghatározni annak a team-nek a vonatkozásában, amely a vészhelyzeti bázisállomások szakértői csapatát alkotja. A fent részletezett folyamatok elvégzése széles spektrumon mozog és sokrétű szaktudást igénylő mérnöki gárda felállítását igényli. A csapatot ügyeleti formában 0-24/7 kell alkalmazni minden szolgáltatónak (ezt természetesen szerződéses formában szükséges előre lefektetni). Az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti mobil bázisállomások megvalósításához a lenti ügyeletes alkalmazásban lévő szakértői kompetenciákra van szükség:

- Logisztikai szakértő: a bázisállomás minden szükséges eszközének határidőre való helyszínre szállításáról gondoskodó szakértő;
- Cellatervező szakértő: a bázisállomás lefedettségét, kapacitását és konfigurációját megtervező szakértő;
- Frekvenciatervező szakértő: a bázisállomáshoz szükséges frekvenciákat megtervező szakértő;
- Mikrohullámú átviteltechnika tervező szakértő: a bázisállomáshoz mikrohullámú átviteltechnikáját megtervező szakértő;
- Optikai átviteltechnikai szakértő: a bázisállomáshoz optikai átviteltechnikáját megtervező szakértő;
- Energiaellátási szakértő: a bázisállomáshoz optikai energiaellátását megtervező szakértő, aki gondoskodik a megfelelő áramforrásról, a szünetmentes DC tápok tervezéséről, valamint áramkimaradás esetén az üzemfolytonosság biztosításáról;
- Core hálózati szakértő: a bázisállomás logikai felkonfigurálását központi oldalról végző szakértő;
- Beruházási szakértő: a kivitelezési terveket előállítást menedzselő szakértő, aki a kivitelezés megvalósításáért és annak finanszírozásáért felel;

- Rádiós implementációs szakértő: a bázisállomás helyszíni beüzemelését végző szakértő, aki megvalósítja a rádiós hardverek helyszíni logikai és fizikai implementációját technikusok segítségével;
- Átviteltechnikai implementációs szakértő: a bázisállomás helyszíni átviteltechnikájának beüzemelését, valamint az átviteltechnikai berendezések helyszíni implementációját végző szakértő;
- Energiaellátási implementációs szakértő: a bázisállomás helyszíni tápellátásának beüzemelését végző szakértő, aki implementálja a szünetmentes DC tápot, valamint áramkimaradás esetére üzembe helyezi a diesel generátorokat és az akkumulátorokat;
- Optimalizáló szakértő: az implementációt megelőző hálózati kapacitás felmérését vizsgáló szakértő, aki az üzembe helyezést követő állapotban is követi a hálózati terheltséget, illetve paraméterekkel állítja és optimalizálja a hálózat erőforrásait központi oldalról annak érdekében, hogy a kialakult forgalmat a hálózat kezelni tudja;
- Üzemeltető szakértő (helyszíni): a bázisállomás helyszíni üzemeltetését végző szakértő, aki szükség esetén logikai és fizikai hibaelhárítást végez a helyszínen;
- Üzemeltető és hibaelhárító szakértő (NOC – központi oldalról): a bázisállomás üzemfolytonosságát központi oldalról felügyelő szakértő, aki paraméterek segítségével monitorozza a hálózati performanciát, valamint kiértékel minden érintett résztvevőt, amennyiben probléma vagy anomália lépne fel az üzembiztonság terén;
- Technikus szakértők: a fent részletezett folyamatok megvalósításához és kivitelezéséhez a helyszínen segítséget nyújtó technikus szakértők;
- Biztonságtechnikai szakértő: a bázisállomás mechanikai és elektronikai védelméért felelős szakértő, aki gondoskodik a mobil kerítés felállításáról, üzembe helyezi a biztonsági kamerarendszert, valamint biztosítja a bázisállomás 0-24-es őrzéséhez szükséges őrszolgálatot;

9. Finanziális kérdések

A következő vizsgált pont a pénzügyi szempontokat érinti. Az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomás finanszírozásának kérdése meglátásom szerint nemzetbiztonsági érdekeket képvisel. A fent megalkotott folyamat alapján az Országos Katasztrófavédelem vagy a Belügyminisztérium rendelhet el vészhelyzetet, mellyel kapcsolatban saját hatáskörben kéri a szolgáltatókat az érintett terület rádiós lefedettségének és kapacitásának, valamint ad-hoc telepítésű mobil bázisállomás létjogosultságának vizsgálatára. Ha az előzetes vizsgálatok tükrében a műveleti területen elérhető mobil hálózat megerősítése szükséges operátori oldalról (legyen az lefedettségi vagy kapacitási indok), úgy ezeket állami projekteknek javaslom tekinteni.

10. Időtartami vállalások szempontjai

Végezetül az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomások telepítésének az elrendeléstől számított üzembe helyezési idejét szükséges meghatározni. Javaslatom alapján az SLA-kat, valamint a

hibaelhárításra vonatkozó vállalásokat is a megalkotandó jogszabályban kell definiálni. Ennek keretében kerülne meghatározásra, hogy az elrendeléstől számítva az adott szolgáltatónak mennyi idő áll rendelkezésére az ideglenes bázisállomás üzembe helyezésére a vészhelyzeti területen, továbbá milyen üzemeltetési és minőségi vállalásokat kell teljesítenie e tekintetben (SLA). Továbbá azt is szükséges lefektetni, hogy milyen hibaelhárítási idők vonatkoznak majd a vészhelyzeti állomásokra az üzemfolytonosságot érintő meghibásodás esetére. A fentieket a szolgáltatókkal közösen javaslom megalkotni annak érdekében, hogy meghatározott határidők egy éles helyzetben is megvalósíthatóak legyenek.

A fenti szempontrendszer segítségével szolgálhatna a rádiós hálózatokra vonatkozó vészhelyzeti jogszabály megalkotásához, mellyel megkezdődhetne egy a szolgáltatókkal közösen folytatott tesztidőszak, amelynek köszönhetően a folyamat végén a Felek felkészülté válhatnának a vészhelyzeti protokoll gyakorlati és hatékony végrehajtására. A cél, hogy minden szolgáltatónál álljon rendelkezésre a meghatározott – ügyeletes munkavégzésben alkalmazott – szakértői csapat, amely ilyen helyzetben a jogszabályi definíció mentén azonnali mozgósítással végezhetné honvédelmi feladatát.

5.5 Következtetések

A fejezetben áttekintettem a mobil hálózatokra vonatkozó teljes magyar jogszabályi környezetet, illetve megállapítottam, hogy a rádiós bázisállomások nem teljesítik a nemzeti létfontosságú rendszerelemmé történő kijelölés (ágazati és horizontális) kritériumát, így sem a kritikus infrastruktúrákra vonatkozó előírások, sem pedig egyéb törvények nem szabályozzák a bázisállomások vészhelyzeti szituációkból adódó lokális szolgáltatás vagy kapacitás kiesését érintő problémakört. Továbbá semmilyen jogszabály nem definiálja az operátorok kötelezettségeit, melyek meghatároznák az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomások biztonságtechnikai kérdéseit, valamint a szolgáltatás helyreállítására vonatkozó kötelezettségeket. A jogszabályi hiányosság befedezésére egy szempontrendszert állítottam fel, mely segítségével szolgálhat a vonatkozó jövőbeli jogszabály megteremtéséhez.

A fent ismertetett szempontrendszer a vészhelyzeti állomások létesítésére vonatkozóan minden mobil szolgáltatóra való kiterjesztésével lefedésre kerülhetnek a feltárt jogszabályi hiányosságok. Ugyanakkor tovább gondolandó az a szempont is, hogy krízishelyzetben, a rádiós lefedettség megerősítésének igénye esetén, a szolgáltatás javítására az operátorok mindegyikének külön kell biztosítania az ad-hoc telepítésű vészhelyzeti mobil állomást. A szolgáltatók ilyen célra alkalmazott bázisállomásainak tartószerkezete ugyanis nem alkalmas arra, hogy több (akár 3 - 4 operátor) berendezése felszerelhető legyen, továbbá a speciális teherautó belső tere sem teszi lehetővé az eszköztöbblet implementálását, mely a költségek, valamint az üzembe helyezési időtartamok szempontjából kontraproduktív.

Egyes esetekben – a vészhelyzeti esemény prompt bekövetkezése miatt – a szempontrendszer II. pontjában ismertetett elméleti technikai, tervezési fázisra nem jut elegendő idő. Ezek fényében a jogszabály megalkotásában definiálni szükséges azt is, hogy a szolgáltatóknak mennyi idő állhat maximum rendelkezésre, hogy az ideiglenes állomást beüzemeljék. A mobil bázisállomások

üzemzavarából adódó hibaelhárítási idők esetleges szabályozási dimenzióit szintén érdemes volna átgondolni a jogszabályi hiányosságok kiegészítése során.

Effektív módja lehetne a felkészülési és beüzemelési idő lerövidítésének, ha a vészhelyzeti bázisállomások egy előre elkészített konfigurációval (telepített eszközök, antennák stb.) állnának készenlétben arra az esetre, ha a vészhelyzeti esemény olyan jellegű, ami a fenti tervezési módszerek alkalmazását időben nem teszi lehetővé. Elképzeléseim szerint ez egy olyan extrém kapacitásra tervezett alapkonfiguráció lehetne, amely gyorsan bevethető volna az antenna beállítások helyszínén történő véglegesítésével, melynek tervezése elvégezhető lehet amíg a bázisállomás a helyszínre ér.

Minden szolgáltatót érint a hardverek és szükséges eszközök beszerzése és helyszínre juttatása, valamint a humán erőforrás biztosítása. A fentiek központi megoldása érdekében katasztrófavédelmi és belügyminisztériumi hatáskörben javasolom megfontolni olyan speciális mozgatható mobil bázisállomások létrehozását, amelyekre előzetesen minden szolgáltató antennája felszerelésre kerülne a rádiós, az átviteltechnikai és az egyéb szükséges berendezésekkel együtt. Amennyiben minden megyeszékhelyre elhelyezésre kerülne 1-1 ilyen egység, úgy az üzembe helyezési idő drasztikusan lecsökkenthető lenne az ország teljes területének vonatkozásában, valamint a költségek is minimalizálásra kerülhetnének egy esetleges bevetés során. Ez a megoldás biztonságtechnikai előnyöket hozhatna a rádiós hálózatok vészhelyzeti alkalmazásában, valamint jelentősen növelné a vészhelyzeti kommunikáció üzembiztonságát hazánkban.

6 ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

6.1 Új tudományos eredmények

TÉZIS I.

Szimulációkkal bizonyítottam, hogy egy 5 MHz-re szűkített GSM hálózat esetében egy ideiglenesen telepített vészhelyzeti bázisállomás – egy már meglévő hálózati struktúrába, a város frekvenciatervének felhasználásával – megfelelő jel/zaj viszonyok mellett beilleszthető. Meghatároztam, hogy a vészhelyzeti állomáshoz alkalmazható frekvenciatervezési módszerek közül melyik és milyen feltételekkel alkalmazható (1/1 módszer) a lehető legrövidebb telepítési idő tekintetében [T2][T5][T6].

TÉZIS II.

Élőhálózati analízissel kimutattam, hogy kritikus helyzetekben a GSM 900-as cella, valamint az LTE 800-as mobil hálózatok olyan mértékű torlódást szenvedhetnek el, mely permanens hang és adatszolgáltatás nyújtására már nem képes. Javaslatot tettem arra vonatkozóan, hogy az ilyen esetekben a különböző szolgáltatók hálózati erőforrásainak aggregálásával a torlódások elkerülhetőek lennének [T1][T2][T3][T5][T7].

TÉZIS III.

Szimulációkkal bizonyítottam, hogy kritikus helyzetekben a bázisállomás kiesése esetén városi környezetben korlátozottan, vidéki helyszíneken, valamint ahol az operátorok szolgáltatásai közt számottevő különbségek adódnak különösen indokoltan használható a szolgáltatók közötti frekvencia network sharing (hálózatmegosztás) megoldás, amely a vészhelyzeti lefedettség kiterjesztésére, valamint kisebb-nagyobb volumenű szolgáltatói hálózatkieesések esetén is alkalmazható [T3][T4].

TÉZIS IV.

A vonatkozó magyar jogszabályi környezet feldolgozásával és elemzésével megállapítottam, hogy a mobil hálózat bázisállomásai nem tartoznak a nemzeti létfontosságú rendszerelemek közé. Továbbá nincs szabályozás arra vonatkozóan, hogy a szolgáltatóknak milyen kötelezettségeik vannak a lefedettség vagy kapacitás pótlására, például ad-hoc telepítésű vészhelyzeti bázisállomásokkal. Ezért meghatároztam egy vészhelyzeti mobil bázisállomások telepítésére vonatkozó jogszabályi szempontrendszert, mely segítségével szolgálhat egy későbbi jogalkotói tevékenységhez [T5].

6.2 Ajánlások

Téziseimben ismertetett teoretikus tudományos eredményeim gyakorlati alkalmazásának relevanciáját további kutatások keretében javaslom felülvizsgálni. Amennyiben az érintett területek szakértői érvényt látnak ajánlásaim élőhálózati megvalósítására, tehát feltételezéseim és következtetésem a gyakorlatban is megalapozást nyernek, úgy a mobilhálózatok vészhelyzetben való működését a javasolt fejlesztésekkel kívánom optimalizálni és téziseimmel indirekt módon segíteni a vészhelyzeti kommunikációban érintett felhasználókat.

Az értekezésben kijelölt további kandidált kutatási témáim:

- Vészhelyzeti dedikált TCH csatornák alkalmazásának lehetőségei, valamint a GSM – LTE zavartatás analízise a GSM vivőfrekvenciák LTE határsávval való átfedése tekintetében;
- A lefedettségi network sharing lehetőségeinek további vizsgálata. A kutatás első vizsgálandó aspektusaként az eSIM a témában való alkalmazhatóságát jelölném meg, melynek segítségével a mobil terminál akár több operátor hálózatához is hozzáférhet, igénybe veheti azt, valamint a fent leírt szempontoknak megfelelően végezhet méréseket;
- A network sharing gyakorlati és műszaki megvalósításának kidolgozása és a kapacitási aspektusok további áttekintése. Többek között kapacitási network sharing megvalósíthatóságának lehetőségeit értem a Core hálózatok összekapcsolását illetően, valamint a szolgáltatók különböző technológiái és frekvenciasávjai közti load balancer bevezetésének aspektusait;
- Speciális guruló mobil bázisállomások kiváltása egyéb műszaki megoldásokkal, gyorsan a helyszínre vezényelhető és üzembe helyezhető hordozó technológiák alkalmazásával, például nagy teljesítményű drónok használatával, valamint újgenerációs műholdas átvitel igénybevételeivel (SpaceX Starlink megvalósítása).

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] G. Durgin, T. S. Rappaport, and H. Xu, "Radio Path and Penetration Loss Measurements in and around Homes and Trees at 5,85 GHz," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 11, 1998.
- [2] D. Hawke, "5 Years to 5G: Enabling Rapid 5G System Development," *EE/Times*, 2015. http://www.eetimes.com/author.asp?doc_id=1325670 (accessed Apr. 22, 2018).
- [3] R. N. Mitra and D. P. Agrawal, "5G mobile technology: A survey," *ICT Express*, vol. 1, no. 3, pp. 132–135, 2015.
- [4] Arcanum, "Környezeti katasztrófák és a környezetbiztonság." <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/TenyekKonyve-tenyek-konyve-1/zold-19B21/vilagproblemak-19D00/kornyezeti-katasztrofak-es-a-kornyezetbiztonsag-19E20/> (accessed Dec. 15, 2020).
- [5] EM-DAT, "The International Disaster Database," 2021.
- [6] Maros Dóra, "Távközlési hálózatok működésének nemzetközi és hazai szabályozási kérdései veszély- és katasztrófhelyzetekben."
- [7] Global Terrorism Database, "Incident Over Time," 2022.
- [8] Europol, "Terrorism Situation and Trend Report," 2021.
- [9] Európai Parlament, "Terrorizmus az EU-ban: támadások, halálesetek és letartóztatások 2020-ban," 2021. Accessed: Feb. 14, 2021. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20210628STO07262/terrorizmus-az-eu-ban-tamadasok-halalesetek-es-letartoztatások-2020-ban>
- [10] M. Roser, J. Hasell, B. Herre, and B. Macdonald, "War and Peace - Our World in Data."
- [11] ITU-D, "Emergency Response."
- [12] Politico, "Belgian telecoms 'not back to normal.'" <https://www.politico.eu/article/belgian-phone-network-crashing-under-strain-terror-attacks-airport-mobile/> (accessed May 10, 2016).
- [13] ITU, "Emergency telecommunications," 2021. <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/emergency-telecommunications.aspx> (accessed Apr. 13, 2021).
- [14] ITU-T, "Mandate." <https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Pages/Mandate.aspx> (accessed Apr. 13, 2022).

- [15] WFP, “International Telecommunication Union (ITU) joins network to boost connectivity in humanitarian crises,” 2019. <https://www.wfp.org/news/international-telecommunication-union-itu-joins-network-boost-connectivity-humanitarian-crises> (accessed Apr. 13, 2021).
- [16] ITU-T, “Recommendation E.123. .”
- [17] ITU-T, “SG 2.”
- [18] ITU-T, “PCP-TDR.”
- [19] ITU-D, “ITU Guidelines for national emergency telecommunication plans”.
- [20] ETSI, “Public safety & emergency communications.” Public safety & emergency communications (accessed Jan. 15, 2022).
- [21] ETSI, “TS 102 181 V1.1.1,” 2005.
- [22] ETSI, “TR 102 444 V1.1.1,” 2006.
- [23] ETSI, “TR 102 445 V1.1.1,” 2006.
- [24] ETSI, “TR 102 180 V1.1.1,” 2007.
- [25] ETSI, “TR 102 476 V1.1.1,” 2008.
- [26] ETSI, “TS 102 900 V1.1.1,” 2010.
- [27] ETSI, “TR 102 180 V1.3.1,” 2011.
- [28] ETSI, “TR 102 180 V1.5.1,” 2015.
- [29] ETSI, “TR 103 393 V1.1.1,” 2016.
- [30] ETSI, “TS 103 478 V1.1.1,” 2018.
- [31] ETSI, “TS 103 479 V1.1.1,” 2019.
- [32] ETSI, “TS 103 625 V1.2.1,” 2022.
- [33] Európai Unió Tanácsa, “2008/114/EK Irányelv, az európai kritikus infrastruktúrák azonosításáról és kijelöléséről, valamint védelmük javítása szükségességének értékeléséről,” *Európai Unió Kiadóhivatala*, 2008.
- [34] Belügyminisztérium országos katasztrófavédelmi főigazgatóság, “Kritikus infrastruktúrák védelmével összefüggő hatósági feladatok, jogszabályok”, Accessed: Jun. 07, 2021. [Online]. Available: <https://www.katasztrofavedelem.hu/109/kritikus-infrastrukturak-vedelmevel-osszefuggo-hatosagi-feladatok-jogszabalyok>
- [35] Európai Unió Tanácsa, “Európai Parlament és Tanács (EU) 2016/1148 Irányelve,” *Európai Unió Kiadóhivatala*, 2016.
- [36] A. Valcarce *et al.*, “Airborne Base Stations for Emergency and Temporary Events”.

- [37] Y. Xing, F. Hsieh, A. Ghosh, and T. S. Rappaport, “High Altitude Platform Stations (HAPS): Architecture and System Performance.”
- [38] SpaceX, “Starlink Project.” <https://www.starlink.com/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [39] SpaceX, “Starlink: SpaceX’s satellite internet project,” 2022. Starlink: SpaceX’s satellite internet project (accessed Apr. 16, 2022).
- [40] H. Malsharif, R. Nordin, N. F. Abdullah, and A. H. Kelechi, “How to make key 5G wireless technologies environmental friendly: A review,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 29, no. 10, 2017.
- [41] Z. A. Ghasemi, A. Abedi, and F. Ghasemi, “Propagation Engineering in Radio Links Design,” *Springer Nature Switzerland AG.*, pp. 3–28, 2013.
- [42] NMHH, “Documentation for the tender announced in the announced in the subject of spectrum licences for broadband services,” 2014.
http://nmhh.hu/dokumentum/163049/eloadas_frekvenciasavok_bemutatas_20140429.pdf (accessed Nov. 15, 2016).
- [43] NMHH, “Selection of the winners of the tender procedure announced in the subject of spectrum licences for broadband services,” 2014.
http://english.nmhh.hu/document/165104/uf_1579288_2014_en.pdf (accessed Oct. 15, 2017).
- [44] European Commission, “Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Radio Spectrum Policy Programme,” 2014.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/pdf/?uri=celex:52014dc0228&from=en> (accessed Nov. 10, 2017).
- [45] NMHH, “National Media and Infocommunications Authority Spectrum Strategy 2016-2020 , accessed 15th November 2017,” 2016.
http://english.nmhh.hu/dokumentum/170996/rss_nmhh_2016_komm_fin.pdf (accessed Nov. 10, 2017).
- [46] D. Harborth and M. Pohl, “Standardization of 5G Mobile Networks: A Systematic Literature Review and Current Developments,” *International Journal of Standardization Research*, vol. 15, no. 2, pp. 22–24, 2017.
- [47] L. Coopoe, “Collaboration Enables 5G in Factory of the Future, Electronic Specifier, (2018).,” *Electronic Specifier*, 2018.
<https://www.electronicspecifier.com/robotics/collaboration-enables-5g-in-factory-of-the-future> (accessed May 07, 2018).

- [48] R. Burke, A. Mussomeli, S. Laaper, M. Hartigan, and B. Sniderman, “The Smart Factory,” *Deloitte Insights*, 2017.
<https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/industry-4-0/smart-factory-connected-manufacturing.html> (accessed May 05, 2018).
- [49] A. A. F. Saldivar, Y. Li, W. Chen, Z. Zhan, J. Zhang, and L. Y. Chen, “Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective,” in *2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2015, pp. 1–20.
- [50] S. Su, I. J. Rudas, J. M. Zurada, M. J. Er, J. Chou, and D. Kwon, “Industry 4.0: A Special Section in IEEE Access,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12257–12261, 2017.
- [51] N. I. S. T., “Strategic R&D Opportunities for 21st Century Cyber-Physical Systems,” 2013.
- [52] R. Atat, “Enabling Cyber-Physical Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions and Applications,” *PhD Dissertation*, pp. 1–20, 2017.
- [53] NMHH, “Documentation of the Auction Procedure Announced for Frequency Use Entitlements Related to Wireless Broadband Services Specially Supporting the Introduction of 5G,” 2019.
https://english.nmhh.hu/article/204903/Documents_of_the_auction_procedure_announced_for_frequency_use_entitlements_related_to_wireless_broadband_services_specially_supporting_the_introduction_of_5G (accessed Jul. 10, 2019).
- [54] HWSW, “Ennyit fizetnek a szolgáltatók havonta az új 5G-s sávokért,” 2020.
<https://www.hwsz.hu/hirek/61613/5g-savhasznalati-dij-frekvencia-spektrum-nmhh-vodafone-telekom-telenor.html> (accessed Mar. 16, 2021).
- [55] European Commission, “Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G),” Brussels, 2016.
- [56] D. Johnson, “The 5G Dilemma: More Base Stations, More Antennas—Less Energy?,” *IEEE Spectrum*, 2018.
- [57] L. Yang, *Interference Coordination for 5G Cellular Networks*. Springer Cham, Heidelberg, 2015,. Heidelberg: Springer Cham, 2015.
- [58] J. Hoydis, S. Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, 2013.
- [59] Ericsson, *Advanced antenna systems for 5G networks*. Elsevier, 2013.

- [60] GSMA, “5G Spectrum,” 2019. <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/03/5G-Spectrum-Positions.pdf> (accessed Jul. 01, 2019).
- [61] HWSW, “Telenor-főlénnyel zárult a hatóság frekvenciaárverése,” 2021. <https://www.hwsz.hu/hirek/62843/nmhh-aukcio-spektrum-telenor-telekom-vodafone-frekvencia-arveres-900-1800.html> (accessed Mar. 16, 2021).
- [62] NMHH, “150,2 milliárd forintért keltek el a 2022-ben lejáró mobilfrekvenciák,” 2021. https://nmhh.hu/cikk/217525/1502_milliard_forintert_keltek_el_a_2022ben_lejaro_mobilfrekvenciak (accessed Feb. 16, 2021).
- [63] A. Osseiran, F. Boccardi, and V. Braun, “Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.
- [64] N. Agarwal, L. C. Wadia, and V. Apte, “Capacity Analysis of The GSM Short Message Service,” *Indian Institute of Technology Bombay*, pp. 1–3, 2004.
- [65] J. Song, P. Dong, H. Zhou, T. Zheng, X. Du, and M. Guizani, “A Performance Analysis Model of TCP over Multiple Heterogeneous Paths for 5G Mobile Services,” *MDPI*, pp. 1–19, 2018.
- [66] AIRCOM International Ltd, *ILSA User Reference Guide*. Surrey: AIRCOM International, 2011.
- [67] NMHH, “Sávismertető 880-915/925-960 MHz sáv,” 2019.
- [68] IoT Agenda, “LPWAN (low-power wide area network,” *Techtarget*, 2015. <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/LPWAN-low-power-wide-area-network> (accessed May 01, 2018).
- [69] J. Yoon, S. Shin, and S. Suh, “A conceptual framework for the ubiquitous factory,” *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 8, pp. 2174–2189, 2012.
- [70] K. Thramboulidis, D. C. Vachtsevanou, and S. Solanos, “Cyber-Physical Microservices: An IoT-based Framework for Manufacturing Systems,” *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, pp. 1–8.
- [71] S. Miklós and D. Maros, “International Regulations of Interoperation of The Telecommunication Networks in Emergency Situations; Academic and Applied Research in Military Science 3. 5. (2004) pp. 707-714.,” *Academic and Applied Research in Military Science*, vol. 3, no. 5, pp. 707–714, 2004.
- [72] AIRCOM International Ltd, *ASSET Technical Reference Guide*. 2011.

- [73] IEEE Internet Initiative, “Towards a definition of the Internet of Things (IoT),” *IEEE*, 2015.
https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf (accessed May 05, 2018).
- [74] J. Cheng, W. Chen, F. Tao, and C. Lin, “Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing,” *J Ind Inf Integr*, vol. 10, pp. 10–19, 2018.
- [75] C. X. Mavromoustakis, G. Mastorakis, and J. M. Batalla, *Internet of things (IoT) in 5G Mobile Technologies*. Heidelberg: Springer International Publishing, 2016.
- [76] I. Yaqoob, I. A. T. Hashem, A. Ahmed, S. A. Kazmi, and C. S. Hong, “Internet of things forensics: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges,” *Future Generation Computer Systems*, pp. 265–275, 2019.
- [77] E. Hozdić, “Smart factory for industry 4.0: A review, International Journal of Modern Manufacturing Technologies,” *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 2–32, 2015.
- [78] D. Lucke, C. Constantinescu, and E. Westkämper, *Smart Factory - a step towards the next generation of manufacturing*. London: Springer, 2008.
- [79] A. Radziwon, A. Bilberg, M. Bogers, and E. S. Madsen, “The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions,” *Procedia Engineering Volume 69, 2014, Pages 1184-1190*, vol. 69, pp. 1184–1190, 2014.
- [80] Ericsson, “Mobile network traffic Q4 2021,” 2021. Accessed: Dec. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>
- [81] Ericsson, “Mobile data traffic outlook,” 2021.
- [82] Cisco, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper,” 2021.
- [83] O. Givehchi, H. Trsek, and J. Jasperneite, “Cloud computing for industrial automation systems - A comprehensive overview,” 2013.
- [84] C. Yang, Q. Huang, Z. Li, K. Liu, and F. Hu, “Big Data and Cloud Computing: Innovation Opportunities and Challenges,” *International Journal of Digital Earth*, pp. 13–53, 2016.
- [85] M. Glabowski, H. Gacanin, I. Moscholios, and P. Zwierzykowski, “Design, Dimensioning, and Optimization of 4G/5G Wireless Communication Networks,” *Hindawi*, pp. 1–3, 2017.
- [86] D. Tokody and I. J. Mezei, “Creating smart, sustainable and safe cities,” 2017.

- [87] Stone Woodworth, “Main steps to calculate the GSM traffic.” <https://slideplayer.com/slide/3390372/> (accessed Feb. 26, 2021).
- [88] Teltech Insight, “GSM Capacity Station in Radio Network Planning,” Aug. 05, 2020. <https://teltechinsight.blogspot.com/2020/08/how-to-calculate-gsm-capacity-planning.html> (accessed Feb. 26, 2021).
- [89] N. P. Singh, “Theoretical and Real World of 4G,” *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, vol. 5, no. 2, pp. 97–118, 2013.
- [90] R. L. Freeman, *Radio System Design for Telecommunications*. Hoboken, 2007.
- [91] A. R. Mishra, *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation 2G/2.5G/3G. Evolution to 4G*. Chichester, 2007.
- [92] The Institution of Engineering and Technology, “LTE specifications,” 2016. <https://communities.theiet.org/blogs/426/444> (accessed May 10, 2016).
- [93] A. Perez, “Mobile Network Signaling Protocols,” *Science Direct*, pp. 15–44, 2017.
- [94] H. Holma, A. Toskala, and J. Reunanen, *LTE Small Cell Optimization*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. , 2016.
- [95] IoT For All, “Cellular IoT Explained - NB-IoT vs. LTE-M vs. 5G and More,” 2016. <https://www.iotforall.com/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m/> (accessed May 04, 2018).
- [96] Ericsson, “Mobile subscriptions outlook,” 2021.
- [97] Artizanetwork, “DL/UL Acceleration Technologies, Artizanetwork.” http://www.artizanetworks.com/lte_resources/lte_tut_adv_acceleration.html (accessed Nov. 25, 2016).
- [98] A. Abrol, R. K. Jha, S. Jain, P. Kumar, and P. J. Joint, “Power allocation and relay selection strategy for 5G network: A step towards green communication,” *Telecommunications Systems*, vol. 68, no. 1, 2018.
- [99] J. Lloret, S. Sendra, and E. Macias-Lopez, “Advances in Green Communications and Networking,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 24, pp. 653–656, 2019.
- [100] K. A. Alnajjar, “Receiver Design for Massive MIMO,” *PhD Dissertation*, pp. 1–40, 2015.
- [101] L. Berek, *Biztonságtechnika*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Magyar Program, 2014.
- [102] J. G. Andrews, S. Buzzi, and C. Wan, “What Will 5G Be?,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.

- [103] T. Berek and T. Horváth, “Fizikai védelmi rendszerek dinamikusan változó környezetben,” *Hadmérnök*, vol. 9, no. 2, pp. 16-16, 2014.
- [104] Gy. Lukács and L. Gábor, *Új Vagyonvédelmi Nagykönyv*. Budapest: CEDIT 2000 Kft., 2002.
- [105] T. Berek, “Vagyonvédelmi koncepció kialakításának sajátosságai veszélyes anyagok vizsgálatát biztosító létesítmények esetében,” *Hadmérnök*, vol. 4, no. 1, 2011.
- [106] T. Berek, “ABV (CBRN) analitikai laboratórium beléptetőrendszere a biztonságos üzemeltetés szolgálatában,” *Hadmérnök*, vol. 6, no. 2, pp. 21–36, 2011.
- [107] HamWiki, “ERP.” <https://wiki.ham.hu/index.php?title=ERP> (accessed Feb. 08, 2021).
- [108] Aircom International Ltd., *ASSET User Reference Guide*. Surrey: Aircom International, 2013.
- [109] S. Utassy, “Vagyonvédelmi rendszerek tervezése, telepítése,” *Detektor Plusz*, pp. 18–20, 2007.
- [110] Inc. The Fiber Optic Association, “Fiber To The Antenna For Wireless.” <http://www.thefoa.org/tech/ref/appln/FTTA.html> (accessed Apr. 10, 2018).
- [111] M. Fiorani, “On the Design of 5G Transport Networks.,” *Photonic Network Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 403–415, 2015.
- [112] D. Mössner, “LTE signal quality parameters.” <https://support.zyxel.eu/hc/en-us/articles/360005188999-LTE-signal-quality-parameters> (accessed Feb. 08, 2021).
- [113] H. Halbauer, A. Weber, D. Wiegner, and T. Wild, “Energy Efficient Massive MIMO Array Configurations,” in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2018, pp. 1–6.
- [114] Larsson E. G. and Björnson E., “What is Massive MIMO,” *Massive MIMO Blog*. <https://ma-mimo.ellintech.se/about-this-blog/> (accessed May 01, 2019).
- [115] L. Berek, T. Berek, and L. Berek, *Személy- és vagyonbiztonság*. Budapest: ÓE-BGK 3071, 2016.
- [116] C. Bockelmann *et al.*, “Massive Machine-type Communications in 5G: Physical and MAC layer solutions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 9, pp. 59–65, 2016.
- [117] Keith R., “5G Energy Efficiency Explained,” *A10*. <https://www.a10networks.com/blog/5g-energy-efficiency-explained/> (accessed Jun. 28, 2019).

- [118] M. H. Alsharif, A. H. Kelechi, J. Kim, and J. H. Kim, “Energy Efficiency and Coverage Trade-Off in 5G for Eco-Friendly and Sustainable Cellular Networks,” *MDPI*, vol. 11, no. 3, 2019.
- [119] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang, and Han T., “5G Ultra-Dense Cellular Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 72–79, 2016.
- [120] W. Haerick and M. Gupta, “5G and the Factories of the Future,” 2015. Accessed: May 05, 2018. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-White-Paper-on-Factories-of-the-Future-Vertical-Sector.pdf>
- [121] L. Berek, A. Vass, and D. Maros, “Az interdependencia kérdése az energetikai rendszer és a híradástechnika esetén a kritikus infrastruktúra biztonsága érdekében,” *Bolyai Szemle*, vol. 24, no. 3, pp. 9–32, 2015.
- [122] S. K. Khaitan and J. D. McCalley, “Design Techniques and Applications of CyberPhysical Systems: A Survey,” *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 350–360, 2015.
- [123] R. Baheti and H. Gill, “Cyber-physical Systems,” *IEEE Control Systems Society*, 2011.
- [124] L. Monostori *et al.*, “Cyber-physical systems in manufacturing,” *CIRP Annals*, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016.
- [125] “2012. évi CLXVI. törvény a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről,” *Magyar Országgyűlés*, 2012.
- [126] “65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról,” *Magyar Kormány*, 2013.
- [127] “249/2017. (IX. 5.) Korm. rendelet az infokommunikációs technológiák ágazathoz kapcsolódó létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről *,” *Magyar Kormány*, 2017.
- [128] Magyar Országgyűlés, “2013. évi L. törvény az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról,” 2013.
- [129] Magyar Kormány, “187/2015. (VII. 13.) Korm. rendelet az elektronikus információs rendszerek biztonsági felügyeletét ellátó hatóságok, valamint az információbiztonsági felügyelő feladat- és hatásköréről, továbbá a zárt célú elektronikus információs rendszerek meghatározásáról,” 2015.

- [130] Magyar Kormány, “271/2018. (XII. 20.) Korm. Rendelet: az eseménykezelő központok feladat- és hatásköréről, valamint a biztonsági események kezelésének és műszaki vizsgálatának, továbbá a sérülékenységvizsgálat lefolytatásának szabályairól;” 2018.
- [131] Magyar Kormány, “41/2015. (VII. 15.) BM rendelet az állami és önkormányzati szervek elektronikus információbiztonságáról szóló 2013. évi L. törvényben meghatározott technológiai biztonsági, valamint a biztonságos információs eszközökre, termékekre, továbbá a biztonsági osztályba és biztonsági szintbe sorolásra vonatkozó követelményekről,” 2015.
- [132] Magyar Országgyűlés, “2003. évi C. törvény az elektronikus hírközlésről,” 2003.
- [133] Magyar Kormány, “217/2020. (V. 21.) Korm. rendelet a mobil rádiótelefon szolgáltatást nyújtó elektronikus hírközlési szolgáltatók és a hivatásos katasztrófavédelmi szerv központi szerve közötti együttműködés rendjéről,” 2020.
- [134] Európai Parlament és Tanács, “2018/1972 Irányelv, Az Európai Elektronikus Hírközlési Kódex létrehozásáról,” 2018.
- [135] 4/2016. (VII. 28.) NMHH rendelet, “Az informatikai és elektronikus hírközlési, továbbá a postai ágazat ügyeleti rendszeréről, valamint a szolgáltatók bejelentési és kapcsolattartási kötelezettségeiről”.
- [136] P. Oviroh and T. C. Jen, “The energy cost analysis of hybrid systems and diesel generators in powering selected base transceiver station locations in Nigeria,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [137] A. Andrae and T. Edler, “On global electricity usage of communication technology: Trends to 2030,” *Challenges*, vol. 6, no. 1, pp. 117–157, 2015.
- [138] Á. Zs. Mohai, “A tűzjelző berendezések riasztási hatékonysága,” *Műszaki Katonai Közlöny*, vol. 27, no. 3, pp. 20–37, 2017.
- [139] Á. ZS. Mohai, “Active fire safety on construction sites,” *Műszaki Katonai Közlöny*, vol. 27, no. 4, pp. 55–69, 2017.
- [140] B. Hameed, F. Durr, and K. Rothermel, “RFID based Complex Event Processing in a Smart Real - Time Factory,” *Functional Thinking for Value Creation*, pp. 326–331, 2011.
- [141] I. Abad, C. Cerrada, and J. A. Cerrada, “METAPEDCAS: Introduction Semantic RFID Data Management in: G. Urzaiz et al. (Eds.): Ubiquitous Computing and

Ambient Intelligence,” in *Unique Radio Innovation for the 21st Century*, 2013, pp. 199–206.

[142] T. Berek and Z. Takács, “RFID technológia mint a kórházbiztonság területén megvalósuló intézményi rend biztosításának eszköze,” *Hadmérnök*, vol. 8, no. 2, 2013.

[143] P. Frenger, C. Friberg, Y. Jading, M. Olsson, and O. Persson, “Radio network energy performance: Shifting focus from power to precision,” *Ericsson Review*, pp. 2–4, 2014.

ÉRTEKEZÉssel KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓIM

[T1] Z. M. Temesvári and D. Maros, “Data Transfer Rates and Data Traffic Trends on Mobile Networks,” INDECS (Web of Science), 2019.

[T2] Z. M. Temesvári, D. Maros, and P. Kádár, “Review of Mobile Communication and the 5G in Manufacturing,” *Procedia Manufacturing* (Scopus), 2019.

[T3] D. Tokody, Z. Rajnai, A. Albini, L. Ady, and Z. M. Temesvári, “Kiberbiztonság az autópárhánban,” *Bánki Közlemények*, 2018.

[T4] Z. M. Temesvári, “Mobil bázisállomások vagyónvédelme,” *Hadmérnök*, 2018.

[T5] Z. M. Temesvári and D. Maros, “Mobilhálózatok kapacitása vészhelyzetben,” *Hadmérnök*, 2017.

[T6] Z. M. Temesvári, “Review of Frequency Spectrum and Energy Consumption in 5G,” in 2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering , 2019, pp. 21–26.

[T7] Z. M. Temesvári, “Az elérhető adatátviteli sebesség, valamint adatforgalmazási tendenciák mobilhálózatokon,” in XXXII. Kandó konferencia , 2016, pp. 1–6.

[T8] P. Kádár, Z. M. Temesvári, and I. Szén, “Innovative solutions in the 125 years old Budapest Metro No.1.,” in 2020 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering, 2020, pp. 21–26.

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

3GPP: Third Generation Partnership Project - harmadik generációs partnerségi projekt;

AML: Advanced Mobile Location – mobil helymeghatározás következő fejlesztése;

BBU: Base Band Unit – alapsávi jelfeldolgozó egyeség;

BCCH: Broadcast Control Chanel – műsorszóró vezérlőcsatorna;

BSC: Base Station Controller – GSM bázisállomás vezérlők;

BSIC: Base Station Identity Code – a bázisállomás azonosító kódja;

C/A: Carrier to Adjacent Ratio – kiszolgáló-vivőfrekvencia és a szomszédos csatorna aránya;

C/I: Carrier to Interference Ratio – kiszolgáló-vivőfrekvencia és az interferencia aránya;

CA: Carrier Aggregation – a különböző LTE frekvencián üzemelő cellák kapacitásának összefogásával az adatátviteli sebesség növelhető, megsokszorozható;

CAGR: Compound Annual Growth Rate – Összetett éves növekedési ráta;

Core hálózat: Központi mobil rendszerelemek;

CQI: Channel Quality Indicator – Csatorna-minőségi mutató. Ez a paraméter 0 és 15 közötti értékeket vehet fel. A VoLTE szolgáltatáshoz szükséges CQI érték 1, a szimulációk során is ez a paraméterérték került beállításra a VoLTE vizsgálatok során;

CS: Circuit Switched – áramkörkapcsolt, a 2G és 3G hálózat hangszolgáltatási módjának típusa;

CSFB: Circuit Switched Fall Back – áramkörkapcsolt visszaesés, mely az LTE hálózaton indított hívás 2G-re vagy 3G-re való végződését jelenti;

DRB: Data Radio Bearer – adathordozó csatorna;

DSS: Dynamic Spectrum Sharing – dinamikus spektrumhasználat, melynek segítségével 4G rádió fölött és annak frekvenciának használatával nyújtanak 5G szolgáltatás. 5G szolgáltatás, 4G-like performanciával;

DWDM: Dense Wavelength-Division Multiplexing: sűrű hullámhossz-osztásos multiplexelést használó optikai transzport technológia;

ECI: European Critical Infrastructure – európai kritikus infrastruktúrák;

EDGE: Enhanced Data rates for GSM Evolution – a GSM hálózat adatforgalmáért felelős, alacsony adatviteli sebességre képes, mára már elavult technológia;

EIRP: Effective Isotropic Radiated Power - izotróp antennához viszonyított tényleges kisugárzott teljesítmény;

EMTEL: Emergency Telecommunications – ETSI vészhelyzeti telekommunikációval foglalkozó szervezete;

eNodeB (eNB): Evolved Node Base Station – LTE bázisállomás;

EPCIP: European Programme for Critical Infrastructure Protection – a kritikus infrastruktúrák védelmére vonatkozó európai program;

Erlang: Telekommunikációs forgalom jellemzésére szolgáló mértékegység. 1 Erlang-nyi mértékegység: egy folytonos hívás, mely egy óra időtartamon keresztül tart;

eSIM: Electronic SIM card – virtuális SIM-kártya;

ETSI: European Telecommunications Standards Institute - Európai Távközlési Szabványosítási Intézet;

ETSI-SES: ETSI Sattelite Earth Stations and Systems – műholdas földi állomások és rendszerek;

FDD: Frequency Division Duplex – frekvenciaosztásos duplex;

Fractional load: Frekvenciatervezői megfontolásból az adott TCH layer-ben szereplő csatornák számára allokált frekvenciák száma. Az érték általában nagyobb, mint a TRX-ek száma (általános konfiguráció szerint TCH TRX szám + 1 db frekvencia kerül kiosztásra), így az egyes vivőket az idő töredékére használja a rendszer (mértéke: az alkalmazott TCH TRX-ek számra osztva a hoppingban alkalmazott frekvenciák számával);

FWA: Fixed Wireless Access – az otthoni vezeték nélküli hozzáférés;

GSM (2G): Global System for Mobile Communications - globális rendszer a mobil kommunikációhoz, a 2G hálózatok elnevezése;

HAPS: High Altitude Platform Station (HAPS) – nagy magasságú platform állomás;

Hopping nyereség: az a nyereség, mely a hopping szekvenciába allokált frekvenciák számának növeléséből adódik;

Hotspot: forgalmas terület;

HSN: Hopping Sequence Number - ugrási szekvencia algoritmusának száma, a HSN szekvencia érték 1-63 intervallumban változtatható, minden egyes érték egy másik ugrási sorrendet (algoritmust) takar;

IP/MPLS: Multiprotocol Label Switching – protokollfüggetlen adatátviteli technológia;

IRDR: International Radio for Disaster Relief – Nemzetközi Rádió a Katasztrófaelhárításért projekt;

ITU: International Telecommunication Union – Nemzetközi Távközlési Unió;

ITU-R: ITU Radiocommunication – az ITU rádiókommunikációs szabványosítási területe;

ITU-T: ITU Telecommunication – ITU Telekommunikációs szabványosítási területe;

KPI: Key Performance Indicators – a hálózati performanciát reprezentáló különböző mutatók és paraméterek;

LEO: Low Earth Orbit – alacsony földkörüli pálya;

Load Balancer: forgalom elosztó funkció, mely a forgalmat az LTE (és egyéb technológiák) frekvenciái közt egyenletesen elosztja a rádiós kondíciók által megengedett lehetőségek fényében;

LOS: Line of Sight – A jel kitakarás nélküli eljutása adott pontba (épületek, tárgyak stb. takarása nélkül);

LTE (4G): Long Term Evolution - 4G mobilhálózat;

MAIO: Mobile Allocation Index Offset (MAIO) – mobil allokációs index;

MEO: Medium Earth Orbit – közepes földkörüli pálya;

MIMO: Multiple-Input and Multiple-Output – A MIMO egy olyan módszer, amely a többutas terjedés kihasználása érdekében több adó és vevőantennát használva megsokszorozza a rádiós kapcsolat kapacitását;

MME: Mobility Management Entity – az LTE mobilitás vezérlő egysége;

MSC: Mobile Switching Center – GSM mobil kapcsoló központok;

MSS: Mobile Switching Center Service – Mobil kapcsolóközpont a GSM architektúrában (mára már csak egy szerverről beszélhetünk (MSS), a régebbi valódi kapcsolóközpont elnevezése: MSC);

NB-IoT: Narrowband-IoT – az LTE-hálózat alatt kis teljesítményen (~ 20-30 dBm) működő technológia 180 KHz-es sávszélességben, mely körülbelül 200 Kbps adatátviteli sebességet kínál;

NETP: National Emergency Telecommunication Plans – nemzeti sürgősségi távközlési tervek;

Network sharing: Kapacitás vagy lefedettség szempontból történő hálózatmegosztás;

NG112: Next Generation 112 – a 112-es segélyhívószám következő generációja;

NOC: Network Operation Center – Hálózatfelügyeleti központ;

OSP: Operation Security Plan – az üzemeltetői biztonsági terv ;

Payload: teljes adatletöltés mértéke adott időintervallumban vizsgálva;

PCI: Physical Cell Identity – fizikai cellaazonosító, a 4G hálózaton forgalmazó terminálok ezen paraméter alapján azonosítják be a cellákat;

PDCH: Packet Data Channel – GPRS/EDGE csatornák;

Power control: A teljesítmény és a TCH TRX-ek dinamikus, forgalomfüggő szabályozása;

PRB: Physical Resource Block – fizikai erőforrásblokkok;

PS: Packet Switched – csomagkapcsolt, az adatsomag továbbítás módszerének típusa;;

PWS: Public Warning System – lakossági értesítő rendszer

RAN: Radio Access Network – rádiós hozzáférési hálózat, a mobil hálózatokon belül a bázisállomások szegmensei;

RRC attach: RRC-kapcsolódás kezdeményezésére irányuló folyamat;

RRC: Radio Resource Control – rádiós erőforrás szabályozó;

RRU: Radio Remote Unit – távoli rádióegység, amely egy rádiófrekvenciás adó/vevő egység, illetve erősítő berendezése a mobil bázisállomásoknak;

RSRP: Reference Signal Received Power – a fogadott pilotjelek (referenciajel) átlagos teljesítménye vagy a bázisállomásról vett jel szintje. Az RSRP értéket dBm-ben mérik;

RSRQ: Reference Signal Received Quality – a fogadott pilotjelek minőségét jellemzi. Az RSRQ értéket dB-ben mérik (dB);

RXQUAL: A bithiba arány osztályozása. 0-7 -ig terjed a skála (7-es a legrosszabb), 0-s érték <0,2%-os BER-t jelent, a 7-es pedig >12,8%-ot;

SDCCH: Standalone Dedicated Control Channel – önálló, dedikált vezérlőcsatorna, mely a BCCH-ban konfigurált;

SINR: A Signal Interference + Noise Ratio, jel, más néven CINR (Carrier to Interference + Noise Ratio) a jelszint és a zajszint aránya (vagy egyszerűen a jel-zaj arány). A SINR értéket dB-ben (dB) mérik. Leegyszerűsítve: minél magasabb az érték, annál jobb a jelminőség. A 0 alatti SINR-értékeknel a kapcsolat sebessége nagyon alacsony lesz, mivel ez azt jelenti, hogy a fogadott jelben több a zaj, mint a hasznos rész, és az LTE-kapcsolat elvesztésének valószínűsége is fennáll;

SLA: Service Level Agreement – szolgáltatási szinteket lefektető szerződés;

SMSC: Short Message Service Center – az SMS küldésért felelős hálózati elem a GSM architektúrában;

SNR: Signal to Noise Ratio – jel/zaj viszony;

SRB: Signaling Radio Bearer – jelzeshordozó csatorna;

SRVCC: Single Radio Voice Call Continuity – rádiós hanghívás folytonossága, az VoLTE-n folyamatban lévő hívás legacy hálózaton történő végződtetése;

SYNTHESIER HOPPING: A synthesier hopping esetében minden TRX képes a hozzárendelt vivőkészleten belül más frekvenciára hangolódni és azt az idő függvényében folyamatosan változtatni. A frekvencia hopping-ba allokált vivők listáját az alkalmazott hopping listaként értelmezzük. A synthesier hopping esetében az egyes TRX-ek szinkronizálása ugyanazon a cellán belül (intra-cell) történik.;

TA: Timing Advance – annak az időtartamnak felel meg, amely alatt a jel a terminálról eléri a bázisállomást. Ezzel a paraméterrel következtetni lehet arra, hogy a terminál milyen távolságra található a bázisállomás pozíciójához képest;

TAU: Tracking Area Update – cellaváltás-handover update;

TCH: Traffic Channel – forgalmi csatorna;

TDD: Time Division Duplex – időosztásos duplex;

TETRA: Terrestrial Trunked Radio (TETRA) - zárt célú rádiótávközlési rendszer, a rendvédelmi szervek által használt privát mobil hálózat;

THP: Throughput – az elérhető adatátviteli sebesség;

TRX: adó-vevő kapacitási egység a GSM technológiában;

UMTS (3G): Universal Mobile Telecommunications System – a 3G hálózatok;

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A 2020-as frekvenciaaukcio pályázható sávjai.....	18
2. táblázat A vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es és MAIO-val (pirossal jelölve) alkalmazott frekvenciaterve	35
3. táblázat A RSRP plot kéken bekarikázott részének legrosszabb lefedettségű pontjában indított mérés beltérben	85
4. táblázat A RSRP plot kéken bekarikázott részének legrosszabb lefedettségű pontjában indított mérés kültérben.....	85
5. táblázat A lekapcsolást követően legrosszabban ellátott területen indított mérések eredményei – beltérben tapasztalható mérés.....	93
6. táblázat A lekapcsolást követően legrosszabban ellátott területen indított mérések eredményei – kültérben tapasztalható mérés	94
7. táblázat A teszterület statisztikái a mérhető legrosszabb pixelben kültérben és beltérben	97
8. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.1)	102
9. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.2)	104
10. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.3)	105
11. táblázat A predikciók statisztikai eredményei (Op.1-3).....	106

A FÜGGELÉK TÁBLÁZATAI

12. Táblázat C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen	154
13. Táblázat C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen a vészhelyzeti bázisállomás beillesztése után	154
14. Táblázat Dedikált vészhelyzeti csatornák használatával mért BCCH C/I a teszterületen	155
15. Táblázat A teszterület TCH C/I méréseinek statisztikája.....	155
16. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás integrációját és annak forgalmi csatornáinak megtervezését követően.....	158
17. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal való használatával	159
18. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal és MAIO tervezéssel	159
19. Táblázat Interferencia szimuláció vészhelyzetre dedikált, élőhálózatban nem használt tiszta csatornákkal.....	159
20. Táblázat A kapacitásproblémák élőhálózati analíziséhez alkalmazott mérési konfiguráció.....	162
21. Táblázat Az LTE 800 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációja	175
22. Táblázat A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségszintek a kiesett bázisállomás lekapcsolását megelőzően a területi teljesülés relációjában.....	176

23. Táblázat A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségzintek a kiesett bázisállomás lekapcsolását követően a területi teljesülés relációjában.....	176
24. Táblázat Az GSM 900 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációja.....	176
25. Táblázat GSM teszterületen készült statisztika a tapasztalható jelszintekre a lekapcsolást megelőzően.....	177
26. Táblázat GSM teszterületen készült statisztika a tapasztalható jelszintekre a lekapcsolás után.....	177
27. Táblázat 4G és 2G bázisállomás kiesésének szimulációjához használt mérési elrendezést.	178
28. Táblázat Jelszintek megléte a tesztteterületen kategóriákra bontra, beltérben mérve.....	178
29. Táblázat Jelszintek megléte a tesztteterületen kategóriákra bontra, beltérben mérve a lekapcsolást követően.....	179
30. Táblázat A teszterület hálózat jelszintjei a vész helyzetben érintett bázisállomás lekapcsolását követően.....	179
31. Táblázat Op.1 mérési konfigurációja.....	179
32. Táblázat Op.2 mérési konfigurációja.....	180
33. Táblázat Op.3 mérési konfigurációja.....	180
34. Táblázat Az alkalmazott bázisállomások konfigurációi.....	181
35. Táblázat RSRP értékek a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató hálózatában mérve.....	181
36. Táblázat RSRP értékek a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató hálózatában mérve.....	182

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Technológiai katasztrófák száma Európában (db/év) [5].....	4
2. ábra Természeti katasztrófák száma Európában (db/év) [5].....	5
3. ábra Technológiai katasztrófák száma Magyarországon [5].....	5
4. ábra Természeti katasztrófák száma Magyarországon [5].....	5
5. ábra A terrorcselekmények statisztikai adatai világszerte [7].....	6
6. ábra Magyarországi terrorcselekmények statisztikai adatai [7].....	7
7. ábra A kelet és nyugateurópai terrorcselekmények (köztük Magyarország) [7]	7
8. ábra Államok közötti konfliktusok és háborúk száma [10]	8
9. ábra A hazai spektrumhelyzet 2021 év végén [62].....	19
10. ábra Teszthelyszínre kijelölt városi környezet a beillesztett GSM állomásokkal [Forrás: saját szerkesztés]	21
11. ábra BCCH frekvencia terv [Forrás: saját szerkesztés]	26
12. ábra Interferencia predikció az új BCCH layer-re (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	26
13. ábra A cellahatárok elhelyezkedésének szimulációja, mellyel együtt a C/I szempontból problémás területre odalátó kiszolgáló cellák láthatóak (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	27
14. ábra A vészhelyzeti állomás BCCH frekvenciaterve [Forrás: saját szerkesztés].....	28
15. ábra Cellahatáros predikció a vészhelyzeti bázisállomás beillesztését követően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	28
16. ábra A C/I szimuláció a BCCH-ra vonatkozólag szintén a vészhelyzeti állomások bekapcsolása után (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	28
17. ábra A TCH frekvenciaterv a vészhelyzeti eset szimulációját megelőzően [Forrás: saját szerkesztés]	30
18. ábra A város C/I interferencia predikciója (a vészhelyzeti állomás beilleszthetőségének előtevékenysége), fekete háromszöggel jelölve az interferencia szempontjából problémás (a BCCH tervezésekor meghatározott) terület (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	31
19. ábra A cellahatáros predikció (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	31
20. ábra A vészhelyzeti bázisállomás TCH frekvenciaterve [Forrás: saját szerkesztés]	32
21. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással (a frekvenciatervezéssel meghatározott forgalmi csatornákkal) - [Forrás: saját szerkesztés].....	32
22. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással, frekvenciatervezés nélkül 1/1 metódus használatával [Forrás: saját szerkesztés]	34
23. ábra Interferencia predikció a vészhelyzeti bázisállomással és a klasszikus frekvenciatervezés helyetti 1/1 metódus használatával, site hopping igénybevételével és MAIO tervezéssel [Forrás: saját szerkesztés].....	35

24. ábra A budapesti GSM 900-as forgalom torlódása 01.01. 0:00-kor negyedórás mérésekre bontva [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	38
25. ábra A vizsgált hálózatra vonatkozó hangforgalom 01.01. 0:00-kor [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	39
26. ábra A vizsgált hálózatra vonatkozó adatforgalom szilveszterkor 01.01. 0:00-kor [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	39
27. ábra Az üzenetküldő applikációk forgalmi eloszlása [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	41
28. ábra Globális mobilhálózati adatforgalom és éves növekedés (ExaByte/hó) [80]	42
29. ábra Globális mobilhálózati adatforgalom jövőbeli alakulása (ExaByte/hó) [82].....	42
30. ábra Globális mobileszköz- és kapcsolatnövekedés [82].....	43
31. ábra Illusztráció egy tömegrendezvényre telepített bázisállomások lehetséges elrendezésére, a szektorok feltüntetésével [Forrás: saját szerkesztés]	44
32. ábra Adatforgalom változás – 1-es rendezvény (bal oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	45
33. ábra Adatforgalom változás – 2-es rendezvény (jobb oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	45
34. ábra Adatforgalom változás – 3-as rendezvény [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	45
35. ábra Az elemzett tömegesemények adatforgalmának változása - 2016, 2017, 2015-höz képest (a növekedés százalékban van megadva) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	46
36. ábra Az 1-es város adatforgalmi változása (bal oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	46
37. ábra Az 2-es város adatforgalmi változása (jobb oldalt) [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	46
38. ábra A 3-as város adatforgalmi változása [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	47
39. ábra A legnagyobb városok adatforgalmának változása 2016 szeptemberéhez képest 2017 szeptemberében [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	47
40. ábra 2G hangforgalom trendje, 4G hangforgalom trendje [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	48
41. ábra Hangforgalom alakulása 2G és 3G együtt [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	49
42. ábra 2G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	49
43. ábra 4G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	49

44. ábra 2G és 5G adatforgalmi trend [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	50
45. ábra BCCH és TCH TRX-ek egy lehetséges konfigurációja [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben]	53
46. ábra BCCH és TCH TRX-ek egy lehetséges konfigurációja a PDCH csatornák TCH-k közé konfigurálásával [Forrás: a vizsgált hálózat adatai saját szerkesztésben].....	53
47. ábra A bázisállomás három celláján belül elérhető adatátviteli sebesség (minél sötétebb a szín, annál nagyobb az elérhető sebesség) [Forrás: saját szerkesztés]	56
48. ábra Az RRC kapcsolódás setup ellehetetlenülésének aránya a maximális RRC kapcsolatok limit elérése miatt 20 MHz-es vivőn [94]	57
49. ábra GSM 900 jelszintmérés eredménye [Forrás: mérési eredmény]	60
50. ábra TCH Traffic (Erlang) – 2 hónapos zoom (bal oldalt) [Forrás: mérési eredmény]	61
51. ábra TCH Traffic (Erlang) – éves statisztika (jobb oldalt) [Forrás: mérési eredmény]	61
52. ábra TCH Traffic (Erlang) – a vizsgált forgalmas nap [Forrás: mérési eredmény]	62
53. ábra TCH drop-ok statisztikái (fent bal oldalt a hívások száma, fent jobb oldalt a hívások eldobásának aránya, lent pedig az eldobott hívások száma) [Forrás: mérési eredmény]	63
54. ábra SDCCH forgalom statisztikái [Forrás: mérési eredmény]	64
55. ábra PS és EDGE forgalom [Forrás: mérési eredmény]	65
56. ábra LTE 800 RSRP mérés [Forrás: mérési eredmény].....	66
57. ábra VoLTE forgalom (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]	67
58. ábra RRC setup sikerességi arány (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]	69
59. ábra RRC drop arány (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]	70
60. ábra Átlagos maximális RRC csatlakozások száma (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény].....	71
61. ábra Downlink (1.-3. ábra) PRB kihasználtság (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]	72
62. ábra Letöltési mennyiség és az elérhető adatátviteli sebesség (L800) [Forrás: mérési eredmény]	72
63. ábra Átlagos letöltési sebesség Carrier Aggregation-nel (L08, L18, L26) [Forrás: mérési eredmény].....	73
64. ábra Átlagos felhasználói szám per TTI (downlink) [Forrás: mérési eredmény]	74
65. ábra Downlink PRB kihasználtság – a legforgalmasabb órában – teljes kapacitását kihasználó cella statisztikája (bal oldalt) [Forrás: mérési eredmény]	76
66. ábra Downlink PRB kihasználtság a szimulált operátor kevésbé terhelt 800-as cellája (jobb oldalt) [Forrás: mérési eredmény].....	76

67. ábra Downlink PRB kihasználtság a két cella számítással való aggregációjával [Forrás: mérési eredmény].....	76
68. ábra A használt antennák horizontális és vertikális sugárzási nyalábjai [Forrás: saját szerkesztés]	81
69. ábra A használt antennák horizontális és vertikális sugárzási nyalábjai 8 fokos electric tilt esetén [Forrás: saját szerkesztés]	81
70. ábra Az alkalmazott beépítettség jelölései és azok vizuális megjelenítése a vizsgált környezetben [Forrás: saját szerkesztés].....	82
71. ábra A teszterületet ellátó és annak környezetében lévő bázisállomások L800-as celláinak ellátási területei [Forrás: saját szerkesztés]	82
72. ábra A kikapcsolást megelőző lefedettség szimulációja, valamint a jelmagyarázat [Forrás: saját szerkesztés]	83
73. ábra Adatletöltési predikció és jelmagyarázata [Forrás: saját szerkesztés]	83
74. ábra a kiesett bázisállomás után bekövetkezett cellák újrendeződése [Forrás: saját szerkesztés]	84
75. ábra A lekapcsolást követő RSRP predikció, késsel bekarikázva a teszterület legrosszabb értéke [Forrás: saját szerkesztés].....	84
76. ábra A downlink irányú adatsebességek terheletlen hálózatra futtatva a szimulációt [Forrás: saját szerkesztés]	85
77. ábra A legrosszabban lefedett pontban egy távoli kiszolgáló cella ~0,5 km távolságból vette át a lekapcsolt bázisállomás 3-as cellájának területét [Forrás: saját szerkesztés]	86
78. ábra A kiszolgáló nyugati cella és a legrosszabb lefedettséggel rendelkező pont közti terepmetszet és Fresnel zóna [Forrás: saját szerkesztés]	86
79. ábra A legrosszabb lefedettséggel rendelkező pont és a tőle keletre elhelyezkedő bázisállomás közti terepmetszet és Fresnel zóna [Forrás: saját szerkesztés]	86
80. ábra Cellahatárokat jelölő predikció, a kiindulási állapot, a kijelölt teszterület feketével [Forrás: saját szerkesztés].....	88
81. ábra Jelerősség predikciója a lekapcsolást megelőzően, az épületcsillapítások levonásával a beltérben tapasztalható lefedettséget szimulálva [Forrás: saját szerkesztés]	88
82. ábra Teljesítmény predikció az épületcsillapítások levonásával a beltérben tapasztalható lefedettséget szimulálva [Forrás: saját szerkesztés].....	89
83. ábra Cellahatárokat jelölő predikció, a vészhelyzetet szimuláló lekapcsolt állapota, az új cellahatárok megfelelőek, a környező cellák dominánsak tudtak maradni [Forrás: saját szerkesztés]	89
84. ábra A terület beépítettségének képe és azok jelentései [Forrás: saját szerkesztés]	91

85. ábra Domborzati térkép és a vizsgálandó településrész, valamint az érintett bázisállomások megjelölése [Forrás: saját szerkesztés]	91
86. ábra Cellahatáros szimuláció (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	92
87. ábra RSRP predikció (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	92
88. ábra A cellahatáros szimuláció a vészhelyzetben érintett bázisállomás kiesését követően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	93
89. ábra RSRP szimuláció a vészhelyzetben érintett bázisállomás kiesését követően (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	93
90. ábra Az adatátviteli sebességek alakulása a tesztet megelőzően (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	94
91. ábra Az adatátviteli sebességek alakulása a lekapcsolást követően, pirossal jelölve a legkritikusabban ellátott rész (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	94
92. ábra A teszterület hálózat beltéri jelszintjei a vészhelyzetben érintett bázisállomás lekapcsolását követően [Forrás: saját szerkesztés].....	96
93. ábra A beépítettség adatbázisa [Forrás: saját szerkesztés].....	100
94. ábra A 3 operátoros szimuláció bázisállomás lokációi tengersizint fölötti és antenna magasság megjelölésével. A különböző operátorok különböző színnel jelölve. Op. 1-3: 1 site - Op.2: 2 site-al látja el a vizsgált települést [Forrás: saját szerkesztés]	101
95. ábra Három operátor bázisállomásainak elhelyezkedése különböző lokációkban, az egyes szolgáltatók külön színnel jelölve, narancssárgával bekeretezve a vizsgált (bel)terület [Forrás: saját szerkesztés]	101
96. ábra Az Op.1 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	102
97. ábra Az Op.1 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	102
98. ábra Op.2 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	103
99. ábra Az Op.2 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés] [Forrás: saját szerkesztés].....	103
100. ábra Az Op.3 LTE 800 lefedettségi predikciója, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	104
101. ábra Az Op.3 GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	104

102. ábra Az Op.1- Op.2 - Op3- LTE 800 -as hálózatának aggregálásával prediktált lefedettség, sárga a VoLTE és adatkapcsolatnak megfelelő kritériumok teljesülését jelöli (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	105
103. ábra Az Op.1- Op.2 - Op3- GSM 900 lefedettségi predikciója, zölddel jelölve, ahol a hang- és „adatkapcsolat” (EDGE) optimális (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés] [Forrás: saját szerkesztés]	105
104. ábra Az Op.1- Op.2 – Op3- LTE 800 -as hálózatának aggregálásával prediktált cellahatáros szimuláció [Forrás: saját szerkesztés]	106
105. ábra A szolgáltatók bázisállomás lokációinak elhelyezkedése, 3 színnel jelölve a különböző szolgáltatók helyszínei és cellái, középen az a piros szolgáltató site-ja, melyen egyedül nyújt szolgáltatást. Narancssárgával jelöltem a vizsgálni kívánt területet [Forrás: saját szerkesztés].....	108
106. ábra RSRP predikció a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	109
107. ábra RSRP predikció a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	109
108. ábra Cellahatáros predikció 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt operátorok tekintetében (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés].....	109
109. ábra Cellahatáros predikció a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató tekintetében (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	109
110. ábra THP predikció a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	110
111. ábra THP predikció a 2-es szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]	110

A FÜGGELÉK ÁBRÁI

112. Ábra A GSM BCCH jelszint predikciója a teszterületre vonatkozólag.....	153
113. Ábra A teszterület cellahatáros predikciója	153
114. Ábra Dedikált vészhelyzeti csatornák használatával mért C/I a teszterületen a bázisállomás kiszolgálási területén.....	155
115. Ábra 11-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt)	156
116. Ábra 12-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	156
117. Ábra 13-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt)	156
118. Ábra 14-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	156
119. Ábra 15-ös vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt).....	156
120. Ábra 16-os vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt)	156

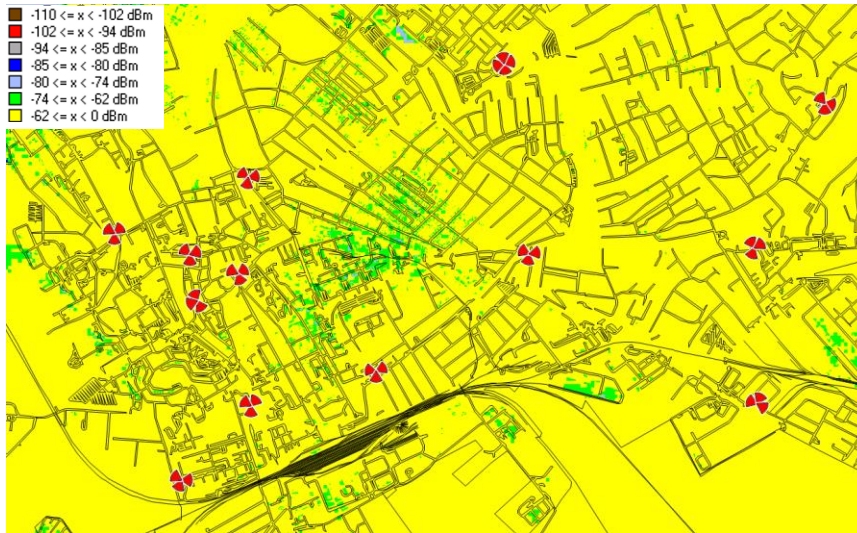
121. Ábra 17-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt).....	157
122. Ábra 18-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	157
123. Ábra 19-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt).....	157
124. Ábra 20-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	157
125. Ábra 21-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt).....	157
126. Ábra 22-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	157
127. Ábra 23-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt).....	158
128. Ábra 24-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt).....	158
129. Ábra 25-ös vivő leosztása és azon cellák cellahatárai	158
130. Ábra A 4G 800 MHz-es sávja és a sávban átfedett 3-3 TCH frekvencia vészhelyzeti alkalmazásra, mely alatt az általam használt 5 MHz -es GSM sáv csatornái (BCCH+TCH) – az ábra csak minta, nem fedi a valóságot a sáv elhelyezkedését illetően.....	161
131. Ábra A vizsgált szektor ellátási területének predikciója.....	162
132. Ábra Cellakimaradás ellenőrzése.....	163
133. Ábra TA paraméterek.....	163
134. Ábra FR és HR forgalmak	164
135. Ábra TCH igénybevételi statisztikák (az allokáció sikerességének és sikertelenségének aránya az első két diagrammon látható. Ezt követően mellékelem a TCH kísérletek, sikeres, valamint sikertelen próbálkozások darabszámát)	165
136. Ábra TCH torlódások statisztikái (bal oldalt napi, jobb oldalt 2 havi bontásra nézve)	166
137. Ábra Handover-ek statisztikái (bejövő, kimenő)	167
138. Ábra Handover-ek sikerességének statisztikái (bejövő, kimenő, SRVCC).....	167
139. Ábra SDCCH statisztikák (kapcsolódási kísérletek, sikeres kapcsolódások, sikertelen kapcsolódások és eldobások)	168
140. Ábra Timing Advance ((L800, L1800, L2600)	169
141. Ábra VoLTE setup kísérletek és drop-ok statisztikái (L800, L1800, L2600)	171
142. Ábra RRC setup kísérlet és sikeresség, valamint RRC drop-ok statisztikái (L800, L1800, L2600).....	172
143. Ábra RRC drop arány (L800, L1800, L2600)	173
144. Ábra Uplink PRB kihasználtság (L800, L1800, L2600)	174
145. Ábra Fent az összes letöltési sebesség, lent az átlag adatátviteli sebesség (L18, L26)	174
146. Ábra Uplink PRB kihasználtság a teljes kapacitását kihasználó cella statisztikája (bal oldalt)	175
147. Ábra Uplink PRB kihasználtság a szimulált operátor kevésbé terhelt 800-as cellája (jobb oldalt)	175

148. Ábra Uplink PRB kihasználtság a két cella számításával való aggregációjával.....	175
149. Ábra Az GSM 900 vizsgálathoz alkalmazott teszterület beépítettségének adatbázisa.....	177
150. Ábra RSRQ plot 1-es és 3-as (kék és feketével jelölt) szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve	182
151. Ábra RSRQ plot a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve	182

FÜGGELÉK

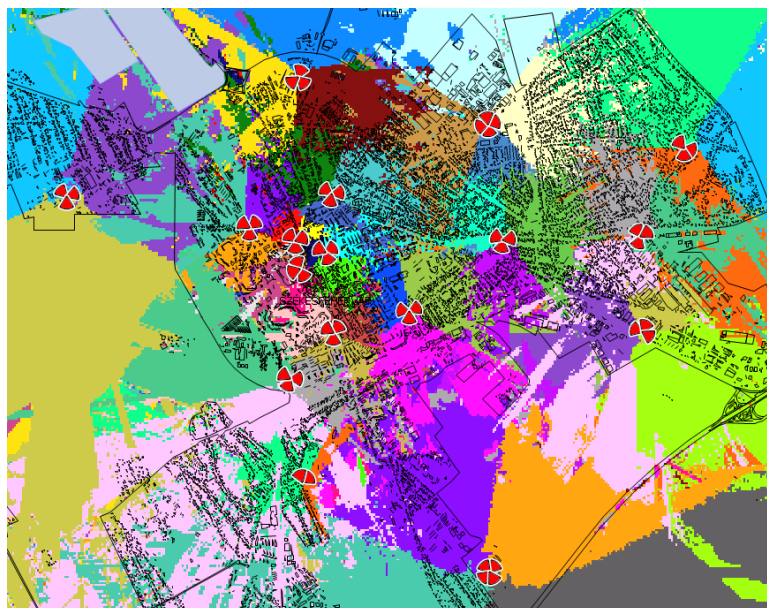
1. Melléklet A power és cellahatáros predikció vizsgálata

Első körben ellenőrizni szükséges, hogy a beillesztett bázisállomásokkal megfelelő jelszinttel ellátható-e a választott teszterület, illetve, hogy a beállított cellahatárok a tervezetteknek megfelelően alakulnak-e. A GSM BCCH jelszint predikcióját a teszterület környezetével a 112. Ábra szemlélteti.



112. Ábra A GSM BCCH jelszint predikciója a teszterületre vonatkozólag [Forrás: saját szerkesztés]

A jelszint predikció kültéri lefedettséget mutat révén, hogy a frekvenciatervezés kültéri értékek figyelembevételével zajlik. A predikciókon az látható, hogy a belvárosi vagy lakott területeken többnyire -62 dBm-nél magasabb jelszint, elszórtan pedig -74 dBm és -62 dBm közötti érték mérhető. A bázisállomások magasságait különböző értékben határoztam meg (az 30 m-től 43 m-ig alakul), a cellák kiszolgálási területét a 113. Ábra szemlélteti.



113. Ábra A teszterület cellahatáros predikciója [Forrás: saját szerkesztés]

A cellahatáros szimuláción látható cellák határai homogéneen kirajzolódnak és optimálisan „oszlanak” el, minden cellának látszik az adott magasságnak megfelelő kiszolgálási területe, jellemzően egyik cella sem „lő” át egymáson (fedi egymást) vagy tűnik el az esetleges rossz antennabeállítások miatt.

2. Melléklet BCCH C/I statisztika a problémás területen mérve

A C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen a lentiekben látható.

12. Táblázat C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km2)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	0,808925		>x>=	16 dB	68,268%
Jó	0,1475	16 dB	>x>=	12 dB	12,448%
Nem optimális	0,091025	12 dB	>x>=	9 dB	7,682%
Rossz	0,0651	9 dB	>x>=	6 dB	5,494%
Nagyon rossz	0,0464	6 dB	>x>=	3 dB	3,916%
Kritikus	0,023475	3 dB	>x>=	0 dB	1,981%

3. Melléklet BCCH C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen a vészhelyzeti bázisállomás beillesztése után

13. Táblázat C/I statisztika az interferencia szempontjából problémás területen a vészhelyzeti bázisállomás beillesztése után [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km2)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	1,088375		>x>=	16 dB	91,852%
Jó	0,03495	16 dB	>x>=	12 dB	2,950%
Nem optimális	0,02825	12 dB	>x>=	9 dB	2,384%
Rossz	0,01375	9 dB	>x>=	6 dB	1,160%
Nagyon rossz	0,011825	6 dB	>x>=	3 dB	0,998%
Kritikus	0,007775	3 dB	>x>=	0 dB	0,656%

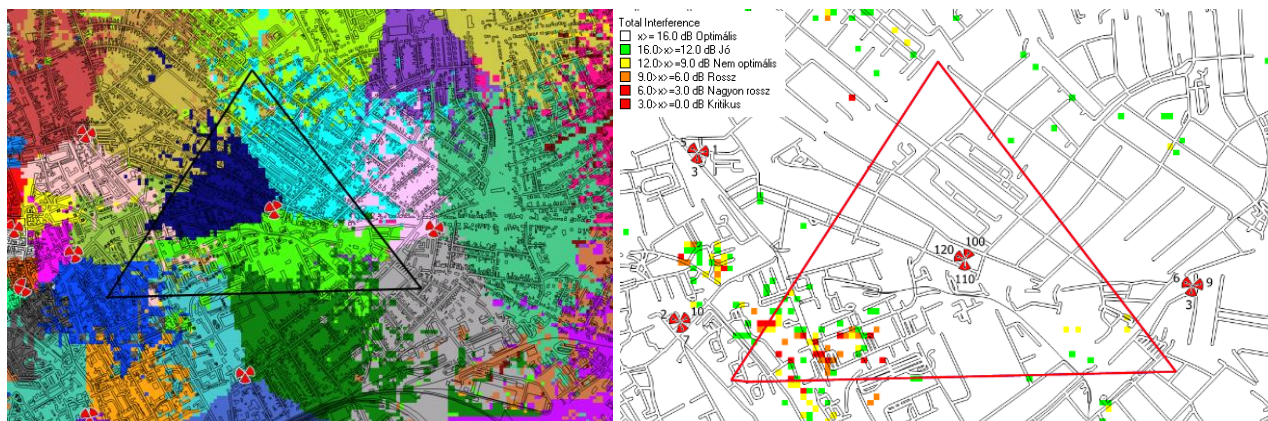
4. Melléklet Dedikált BCCH vészhelyzeti csatornák alkalmazása

A lentiekben azt szeretném bemutatni, hogy milyen mértékben volna csökkenthető az interferencia, amennyiben a szolgáltatók a vészhelyzetekre dedikált vészhelyzeti csatornákat allokálnának. Ezen csatornák feltételezésében publikus cellákra nem kerülhetnének leosztásra, kizárólag vészhelyzet esetére volnának fenntartva. Ezzel megspórolható volna a frekvenciatervezési fázis (és az ezzel járó idő), továbbá a vészhelyzeti állomások prompt és gyorsan integrálhatóak volnának.

Dedikált csatornák kiosztásával teljesen tiszta és kiváló C/I érték kapható (114. Ábra), példában a 100-as, 120-as, és 130-as vivőcsatornát használtam, melyek nincsenek használatban a környező bázisállomások által. A csatornák használata esetén a dedikált vivők szomszédos csatornái által okozott interferenciával lehet esetlegesen számolni (spektrum elhelyezkedéstől függően). A dedikált vészhelyzeti BCCH csatornák használatával kapott C/I eredményét 14. Táblázat foglalja össze, a C/I szimulációt és a cellahatáros predikciót pedig a 114. Ábra mutatja be.

14. Táblázat Dedikált vészhelyzeti csatornák használatával mért BCCH C/I a teszterületen [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km2)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	1,146		>x>=	16 dB	96,715%
Jó	0,013725	16 dB	>x>=	12 dB	1,158%
Nem optimális	0,00935	12 dB	>x>=	9 dB	0,789%
Rossz	0,007575	9 dB	>x>=	6 dB	0,639%
Nagyon rossz	0,005775	6 dB	>x>=	3 dB	0,487%
Kritikus	0,0025	3 dB	>x>=	0 dB	0,211%



114. Ábra Dedikált vészhelyzeti csatornák használatával mért C/I a teszterületen a bázisállomás kiszolgálási területén [Forrás: saját szerkesztés]

5. Melléklet A teszterület TCH csatornáinak C/I mérése

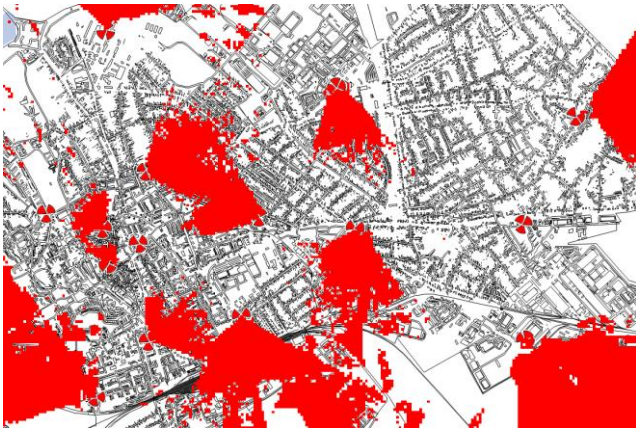
A teszterület TCH csatornáinak mérése a vészhelyzeti bázisállomás beillesztése előtt a 15. Táblázatban látható.

15. Táblázat A teszterület TCH C/I méréseinek statisztikája [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km2)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	0,396		>x>=	12 dB	33,395%
Jó	0,163	12 dB	>x>=	9 dB	13,747%
Nem optimális	0,141	9 dB	>x>=	6 dB	11,859%
Rossz	0,104	6 dB	>x>=	4 dB	8,736%
Nagyon rossz	0,063	4 dB	>x>=	3 dB	5,350%
Kritikus	0,180	3 dB	>x>=	0 dB	15,150%

6. Melléklet teszterület TCH csatornáinak leosztása

Az adott cellára kiosztott csatornák (egyesével 11-es vivőtől kezdve a 25-os csatornáig) a lentiekben láthatóak, mellékelve az adott cella kiszolgálási területét is. Ezzel vizuálisan ellenőrizhető, hogy az azonos csatornák mekkora izolációval és milyen irányban kerültek leosztásra.



115. Ábra 11-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



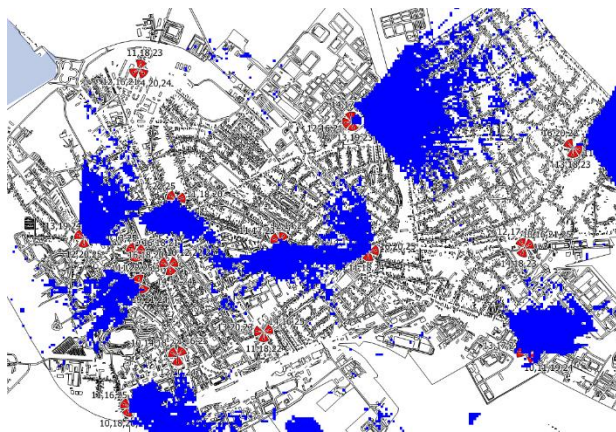
116. Ábra 12-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



117. Ábra 13-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



118. Ábra 14-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



119. Ábra 15-ös vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



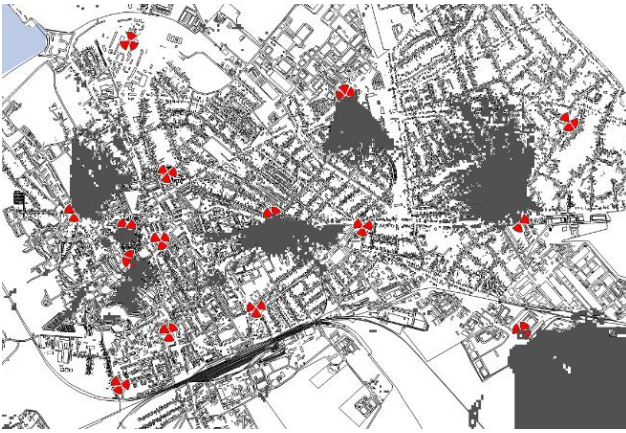
120. Ábra 16-os vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



121. Ábra 17-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



122. Ábra 18-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



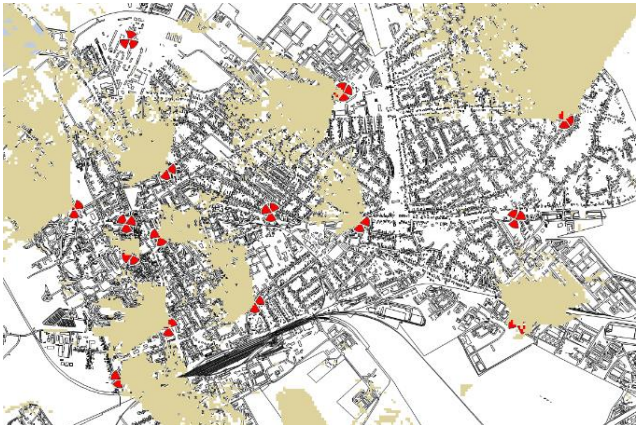
123. Ábra 19-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



124. Ábra 20-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



125. Ábra 21-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

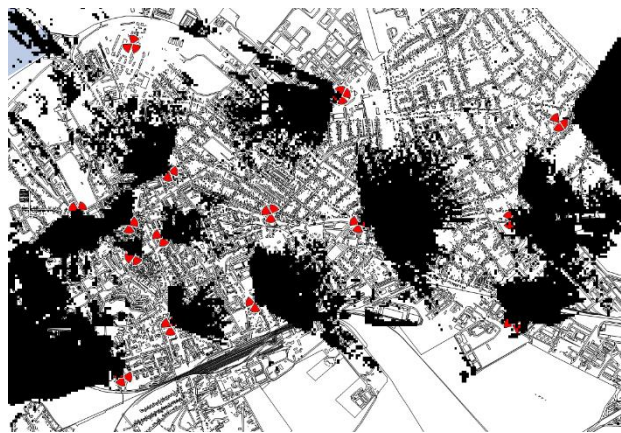


126. Ábra 22-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



127. Ábra 23-as vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (bal oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]

128. Ábra 24-es vivő leosztása és azon cellák cellahatárai (jobb oldalt) [Forrás: saját szerkesztés]



129. Ábra 25-ös vivő leosztása és azon cellák cellahatárai [Forrás: saját szerkesztés]

7. Melléklet A teszterület TCH C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás integrációját és annak forgalmi csatornáinak megtervezését követően

16. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás integrációját és annak forgalmi csatornáinak megtervezését követően [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km ²)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	0,844		>x>=	12 dB	71,261%
Jó	0,116	12 dB	>x>=	9 dB	9,777%
Nem optimális	0,090	9 dB	>x>=	6 dB	7,616%
Rossz	0,045	6 dB	>x>=	4 dB	3,770%
Nagyon rossz	0,021	4 dB	>x>=	3 dB	1,768%
Kritikus	0,050	3 dB	>x>=	0 dB	4,249%

8. Melléklet A teszterület TCH C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal való használatával

17. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal való használatával [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km ²)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	0,114		>x>=	12 dB	9,639%
Jó	0,084	12 dB	>x>=	9 dB	7,093%
Nem optimális	0,110	9 dB	>x>=	6 dB	9,285%
Rossz	0,099	6 dB	>x>=	4 dB	8,393%
Nagyon rossz	0,053	4 dB	>x>=	3 dB	4,462%
Kritikus	0,160	3 dB	>x>=	-12 dB	61,123%

9. Melléklet A teszterület TCH C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal és MAIO tervezéssel

18. Táblázat A teszterület C/I méréseinek statisztikája a vészhelyzeti bázisállomás 1/1-es forgalmi csatornákkal és MAIO tervezéssel [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km ²)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	0,491		>x>=	12 dB	41,463%
Jó	0,096	12 dB	>x>=	9 dB	8,101%
Nem optimális	0,121	9 dB	>x>=	6 dB	10,196%
Rossz	0,095	6 dB	>x>=	4 dB	7,994%
Nagyon rossz	0,047	4 dB	>x>=	3 dB	3,971%
Kritikus	0,135	3 dB	>x>=	-12 dB	28,275%

10. Melléklet Dedikált TCH vészhelyzeti csatornák alkalmazásával mért C/I statisztika

A lenti táblázat alapján így a terület majdnem egészen megfelelő zavartatást mértem, a kritikus 0,5% a környező bázisállomások egymást közti zavartatásából adódik, melyre ráhatása az ad-hoc vészhelyzeti bázisállomásnak nem volt. Az mért C/I az interferencia szimuláció vészhelyzetre dedikált, élőhálózatban nem használt tiszta csatornákkal az alábbi táblázatban látható:

19. Táblázat Interferencia szimuláció vészhelyzetre dedikált, élőhálózatban nem használt tiszta csatornákkal [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Lefedett terület (km ²)	Felső érték	Reláció	Alsó érték	A terület %-os felosztása
Optimális	1,044		>x>=	12 dB	88,105%
Jó	0,048	12 dB	>x>=	9 dB	4,038%
Nem optimális	0,036	9 dB	>x>=	6 dB	3,065%
Rossz	0,019	6 dB	>x>=	4 dB	1,641%
Nagyon rossz	0,006	4 dB	>x>=	3 dB	0,538%

11. Melléklet Az LTE sávval átfedett 3-3 TCH frekvencia vészhelyzeti alkalmazása, az 5 MHz -es GSM sáv csatornáinak (BCCH+TCH) mellékletével

A tárgyban szereplő eljárás spektrális elhelyezkedését a következő ábra szemlélteti.

LTE sáv	felhasználás módja	
4G 800	TCH	
	TCH	
	TCH	
	4G 800 - 20 MHz	
	TCH	
	TCH	
	TCH	
	GSM 1.	BCCH
	GSM 2.	BCCH
	GSM 3	BCCH
GSM 4	BCCH	
GSM 5	BCCH	

GSM 6	BCCH
GSM 7	BCCH
GSM 8	BCCH
GSM 9	BCCH
GSM 10	BCCH
GSM 11	TCH
GSM 12	TCH
GSM 13	TCH
GSM 14	TCH
GSM 15	TCH
GSM 16	TCH
GSM 17	TCH
GSM 18	TCH
GSM 19	TCH
GSM 20	TCH
GSM 21	TCH
GSM 22	TCH
GSM 23	TCH
GSM 24	TCH
GSM 25	TCH

130. Ábra A 4G 800 MHz-es sávja és a sávban átfedett 3-3 TCH frekvencia vészhelyzeti alkalmazásra, mely alatt az általam használt 5 MHz -es GSM sáv csatornái láthatóak (BCCH+TCH) – az ábra csak minta, nem fedti a valóságot a sáv elhelyezkedését illetően
[Forrás: saját szerkesztés]

A megoldás alkalmazása esetén a vészhelyzeti bázisállomás rádiójának és az alkalmazott antennának a 900 MHz-es sáv mellett tudnia kell kezelni a 800 MHz-es sáv elején és végén elhelyezkedő csatornákat is. A módszer alkalmazásával a cellák a TCH rétegei (2TRX-ig) az élő hálózat által használt spektrum felhasználása nélkül, és interferenciától mentesen üzemelnének (amennyiben az LTE sáv átfedésével optimálisan képesek működni a GSM cellák – ezt vizsgálni szükséges). A BCCH layer-t illetően ez a megoldás nem kézenfekvő, mivel ez a réteg teljes teljesítménnyel az idő 100%-ban megjelenik (állandó zavart okozva az LTE alsó és felső sávjában és fordítva). A TCH csatornák esetén azonban power control kerül alkalmazásra a bázisállomás által (tehát amennyiben nincsen forgalom a cellán, úgy a TRX-ek nem működnek, azok deaktiválásra kerülnek), valamint a hopping miatt egy-egy vivő egyébként is csak ms-okra kerül használatra [143].

12. Melléklet A kapacitásproblémák élőhálózati analíziséhez alkalmazott mérési konfiguráció

A valós hálózati mérésekhez alkalmazott konfigurációhoz 2 db 6XPOL-os antenna került alkalmazásra, melyek közül a két alsó antennaágra a GSM 900 és az LTE 800 került bekötésre, az LTE 1800 és a LTE 2600 pedig a két felső ágra.

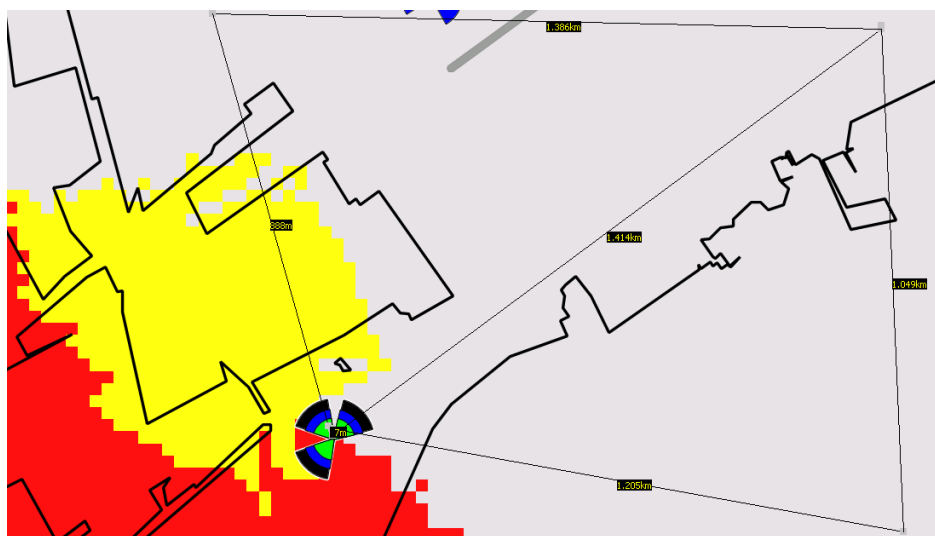
A konfigurációt a lenti táblázat szemlélteti:

20. Táblázat A kapacitásproblémák élőhálózati analiziséhez alkalmazott mérési konfiguráció [Forrás: saját szerkesztés]:

TFM	Magasság	Effektív magasság	Carrier	Antenna	Írány	RRU Teljesítmény	Antenna Mechanikus Dőlése	Antenna Elektronikus Dőlése
105 m	58 m	163 m	GSM 900	Antenna 1: Huawei ASI4518R10 (XPOL 1 - 690- 960)	45 °	40 W	3°	5°
			LTE 800 (10 MHz)	Antenna 2: Huawei ASI4518R10 (XPOL 1 - 690- 960)			3°	3°
			LTE 1800 (20 MHz)	Antenna 2: Huawei ASI4518R10 (XPOL 3 - 1695- 2690)			3°	6°
			LTE 2600 (20 MHz)	Antenna 2: Huawei ASI4518R10 (XPOL 4- 1695- 2690)			3°	6°

13. Melléklet A vizsgált cellák kiszolgálási területe szimuláció alapján

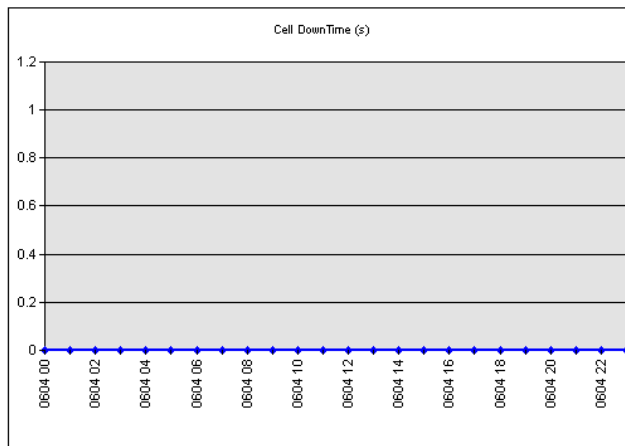
A szektor által kiszolgált területet szoftverrel prediktáltam, a cellák körülbelüli kiszolgálási területére a lenti ábrából következtethetünk, ennek eredményét alább mellékelem (szürkével színezett terület).



131. Ábra A vizsgált szektor ellátási területének predikciója [Forrás: saját szerkesztés]

14. Melléklet A GSM cella üzemfolytonosságának ellenőrzése

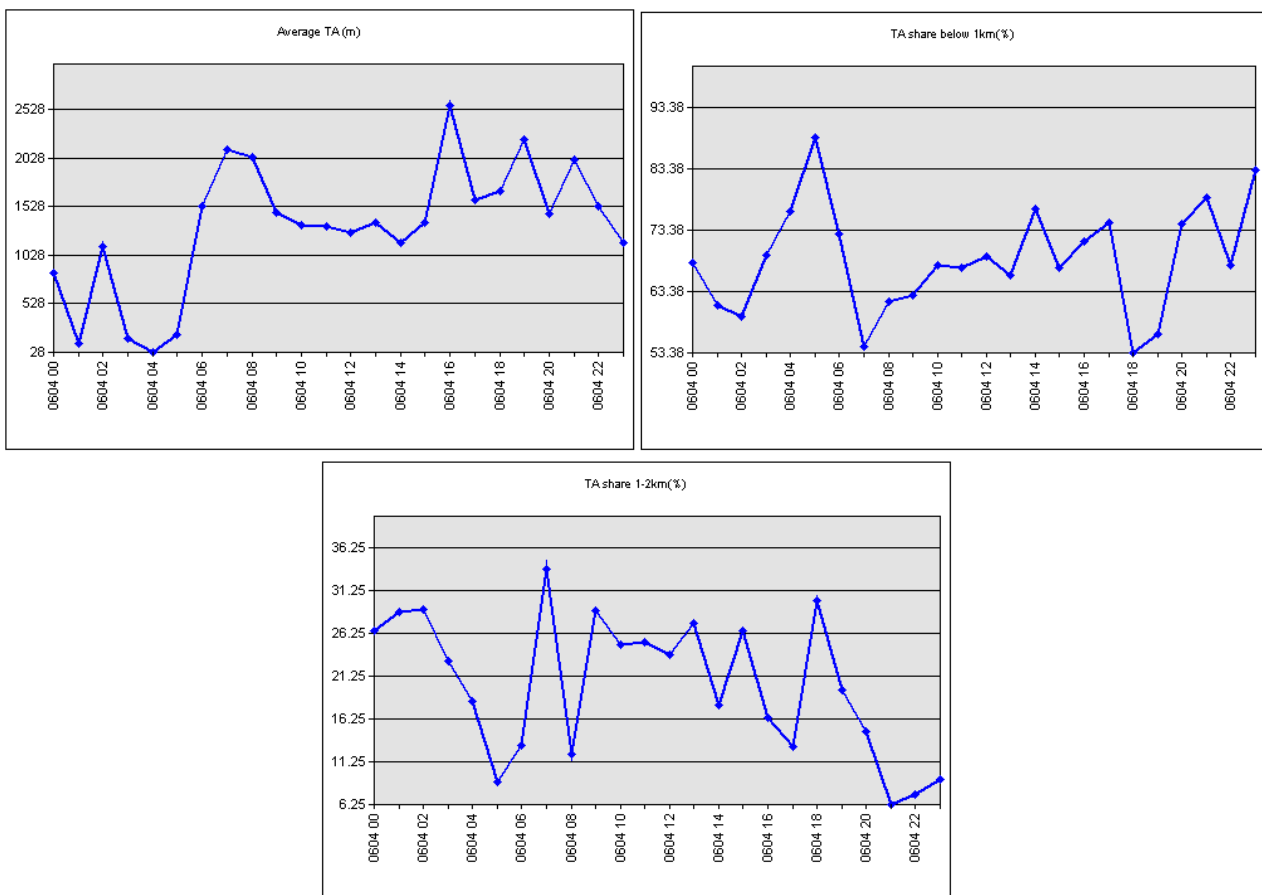
A következő ábra igazolja, hogy nem történt kiesés a mérés időpontjában.



132. Ábra Cellakimaradás ellenőrzése [Forrás: mérési eredmény]

15. Melléklet Timing Advance paraméterek

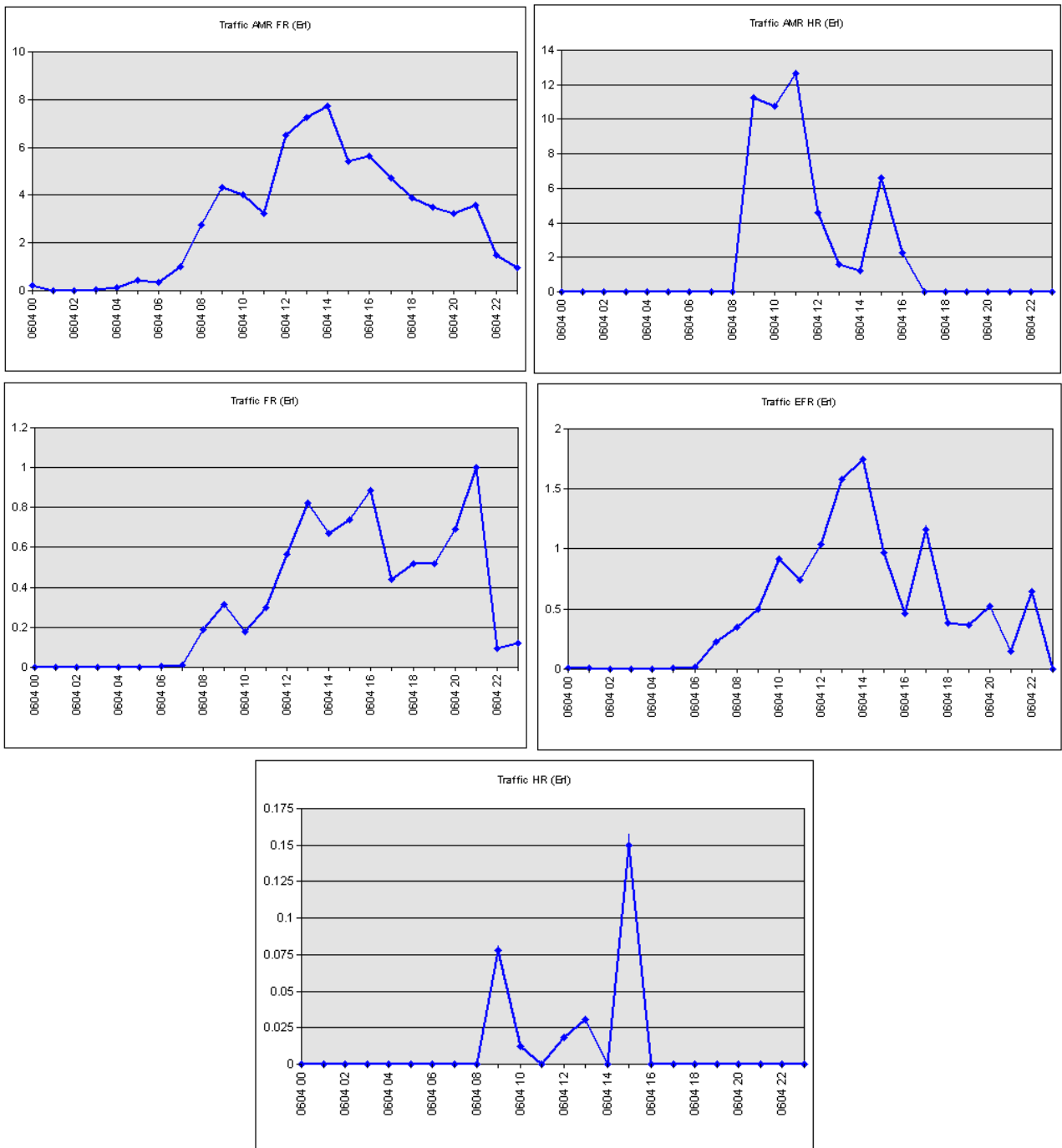
Az átlagos TA (méterben megadva), a TA forgalom eloszlásának aránya 1 km-en belül, valamint 1 - 2 km közötti távolságból a következő diagrammokon található.



133. Ábra TA paraméterek [Forrás: mérési eredmény]

16. Melléklet Full Rate és Half Rate forgalmak a használt kodekek fényében

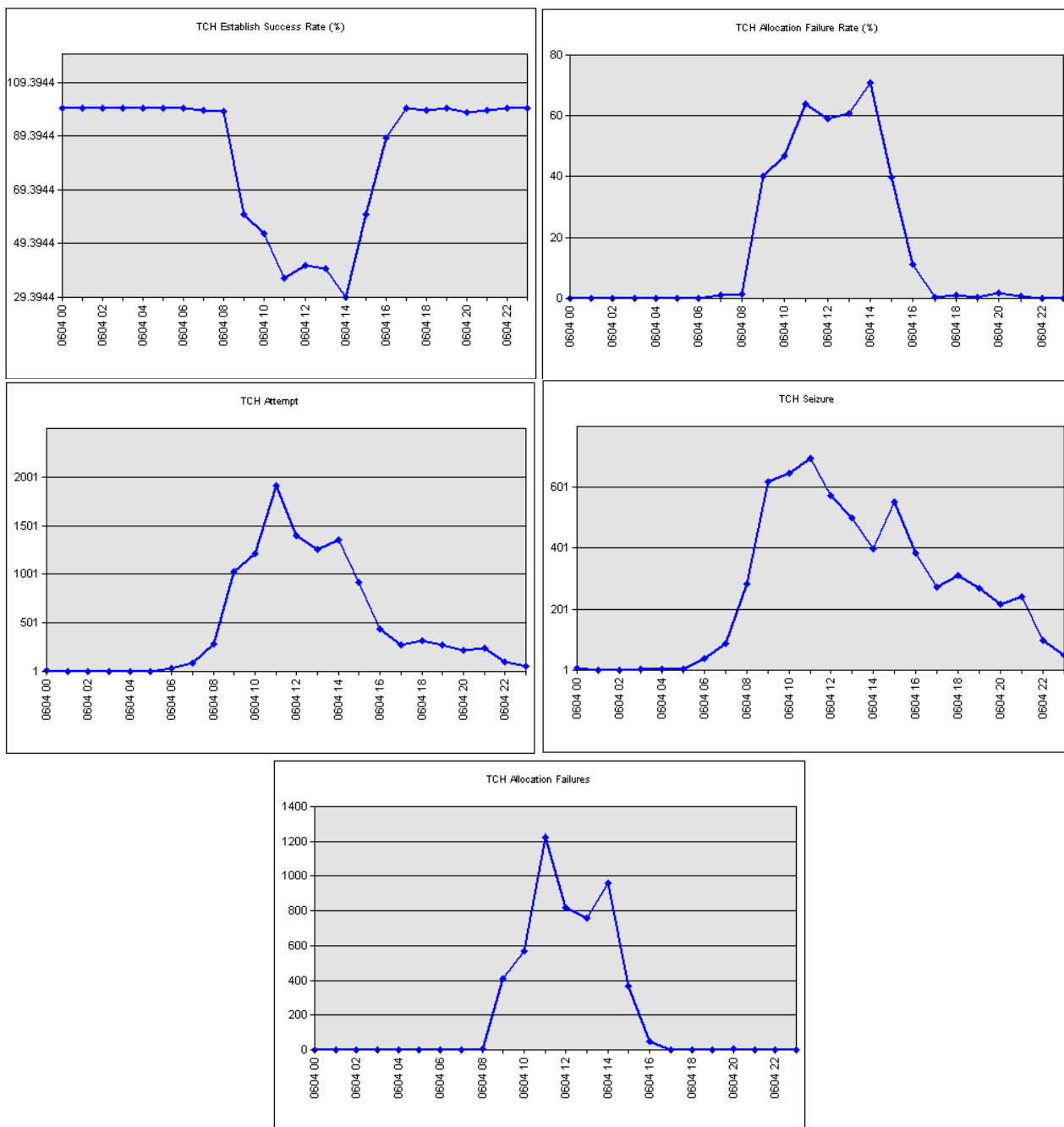
Az AMR Full Rate (Adaptive Multi-Rate), AMR Half Rate, Full Rate, Enhanced Full Rate, valamint Half Rate beszékkodekek használatával zajlott forgalmakat a lenti diagrammok tartalmazzák.



134. Ábra FR és HR forgalmak [Forrás: mérési eredmény]

17. Melléklet TCH igénybevételi statisztikák

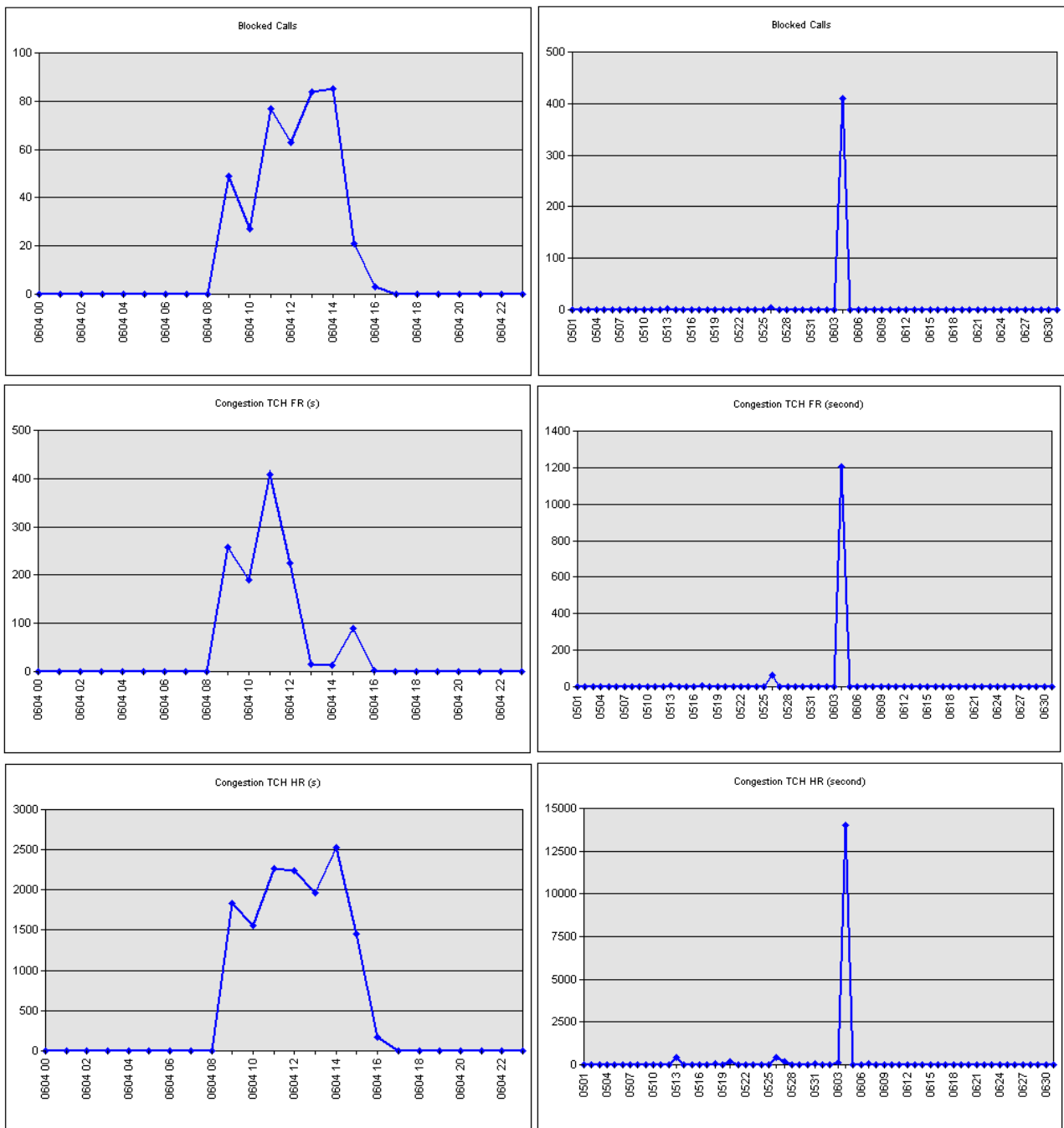
A TCH csatornák létrehozásának, az allokáció sikerességének aránya az első két diagrammon látható. Ezt követően mellékelem a TCH kísérletek, sikeres, valamint sikertelen próbálkozások darabszámát.



135. Ábra TCH igénybevételi statisztikák (az allokáció sikerességének és sikertelenségének aránya az első két diagrammon látható. Ezt követően mellékelem a TCH kísérletek, sikeres, valamint sikertelen próbálkozások darabszámát) [Forrás: mérési eredmény]

18. Melléklet TCH torlódások statisztikái

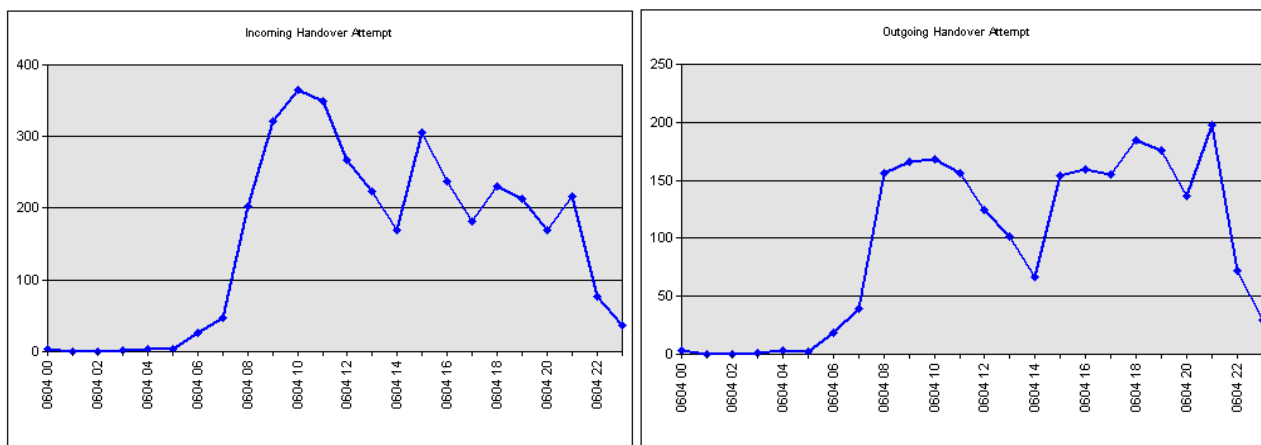
A TCH torlódások statisztikái napi bontásban (bal oldal) és 2 hónapos zoom-ra (jobb oldal) a lentiekben látható:



136. Ábra TCH torlódások statisztikái (bal oldalt napi, jobb oldalt 2 havi bontásra nézve) [Forrás: mérési eredmény]

19. Melléklet Bejövő és kimenő handover kísérletek száma

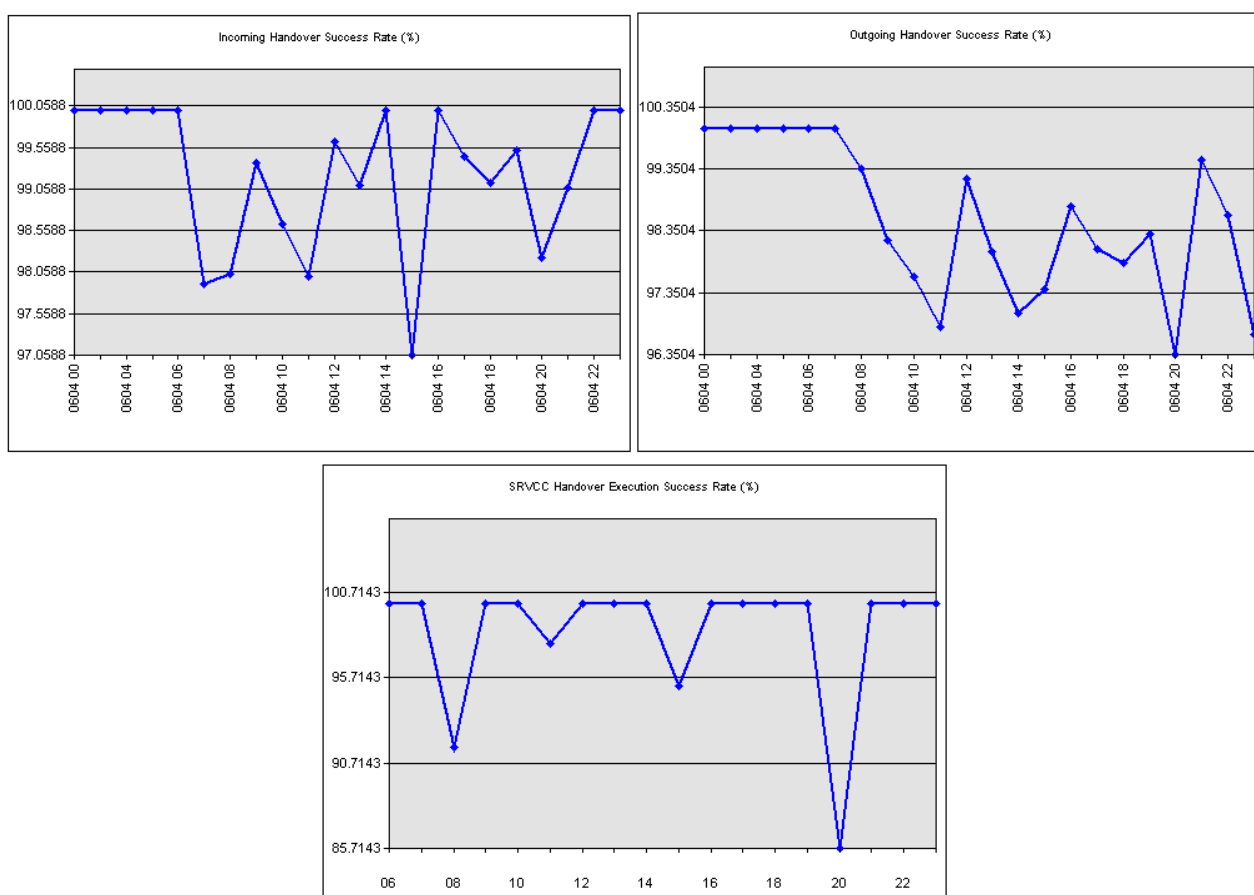
A bejövő és kimenő handover-ek száma a következő két diagrammon látható.



137. Ábra Handover-ek statisztikái (bejövő, kimenő) [Forrás: mérési eredmény]

20. Melléklet Bejövő és kimenő handover sikerességi arány, valamint sikeres SRVCC handover statisztika

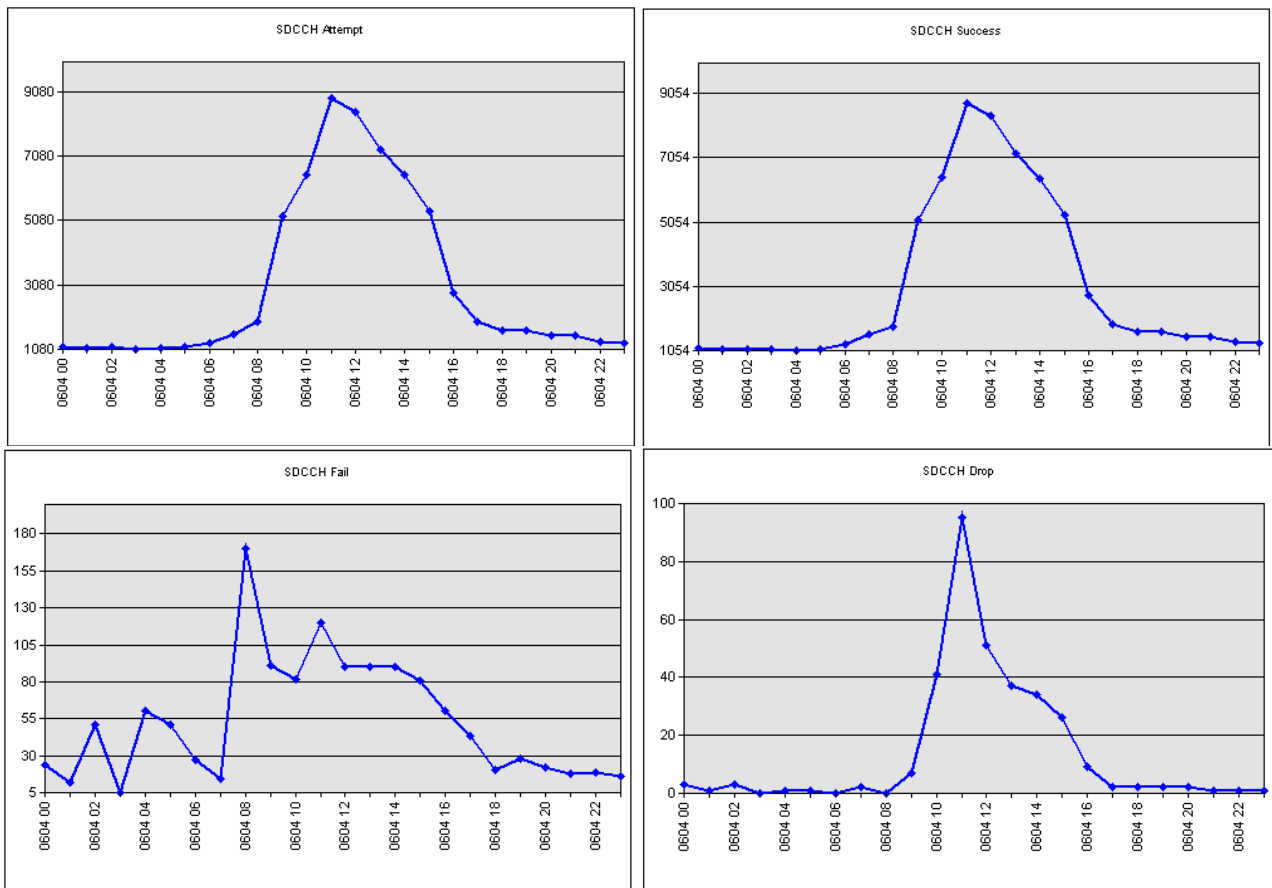
A bejövő és kimenő handover-ek sikerességi arányát, valamint az SRVCC handover sikerességi arányát mutatja be a következő három ábra.



138. Ábra Handover-ek sikerességének statisztikái (bejövő, kimenő, SRVCC) [Forrás: mérési eredmény]

21. Melléklet SDCCH-ra vonatkozó (kapcsolódási kísérlet, sikeresen lezajlott, sikertelen, és eldobott próbálkozások száma) statisztikái

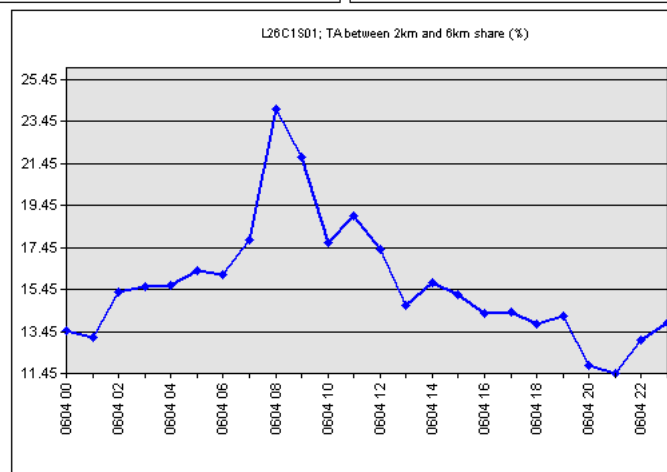
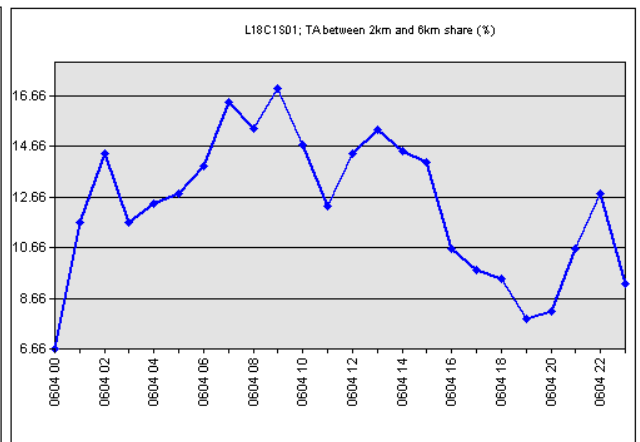
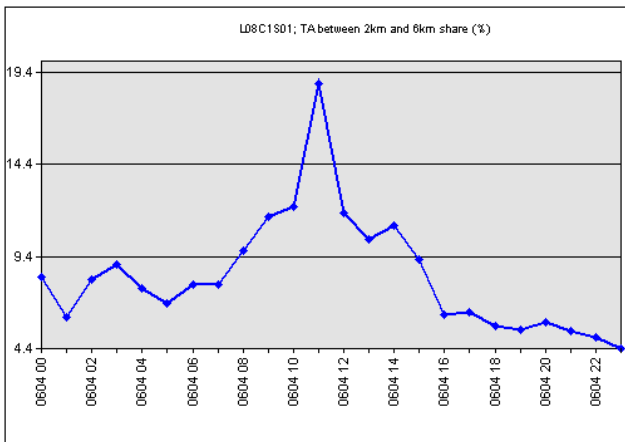
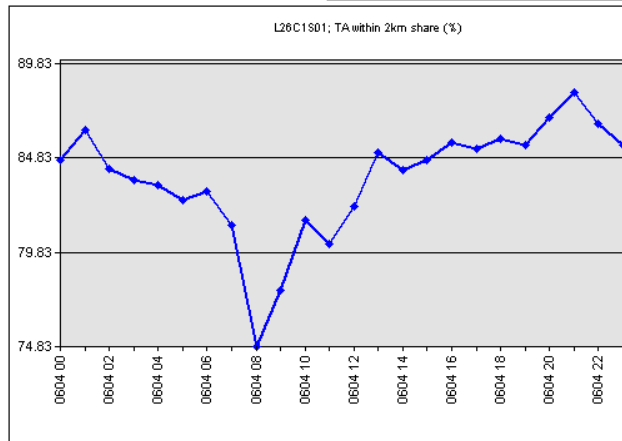
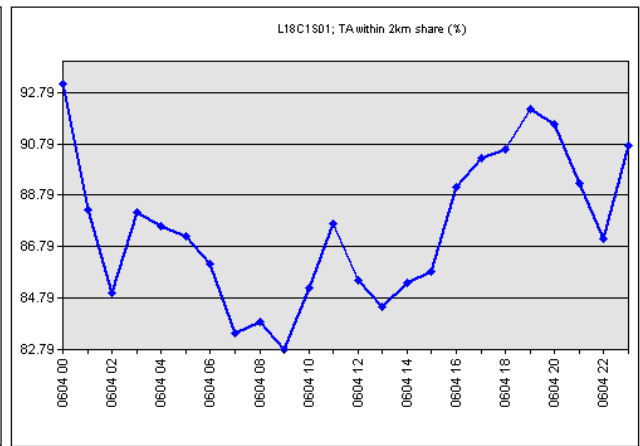
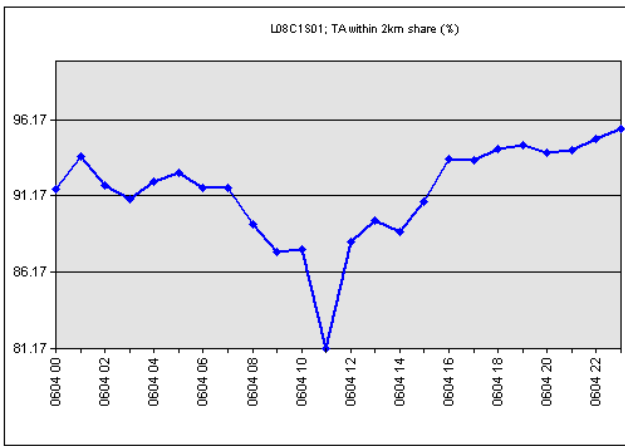
Az SDDCH kapcsolódási kísérletek, sikeres kapcsolódások, sikertelen kapcsolódások és eldobások számát a lenti diagrammok reprezentálják.



139. Ábra SDCCH statisztikák (kapcsolódási kísérletek, sikeres kapcsolódások, sikertelen kapcsolódások és eldobások) [Forrás: mérési eredmény]

22. Melléklet Timing Advance statisztikák az L800, L1800, L2600 cellákra vonatkozólag

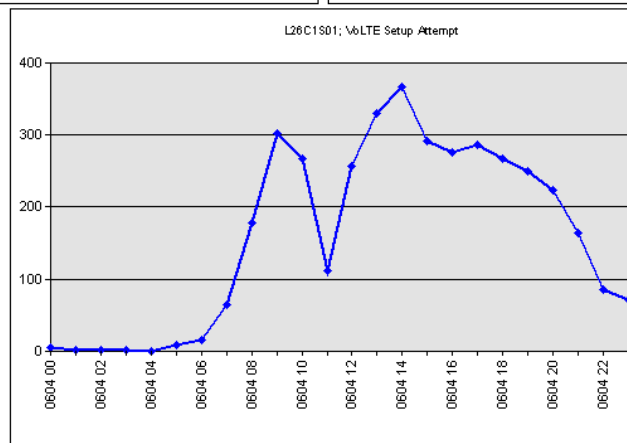
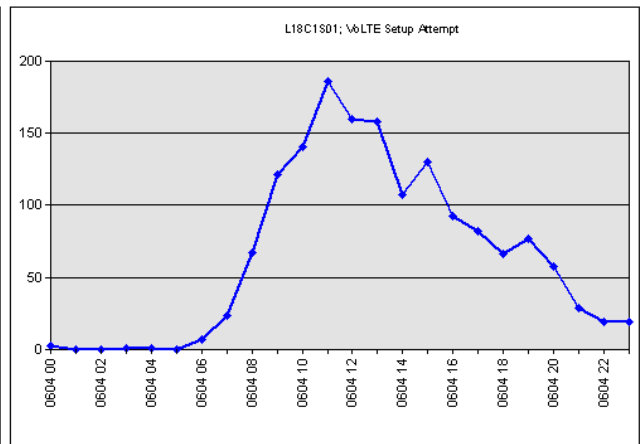
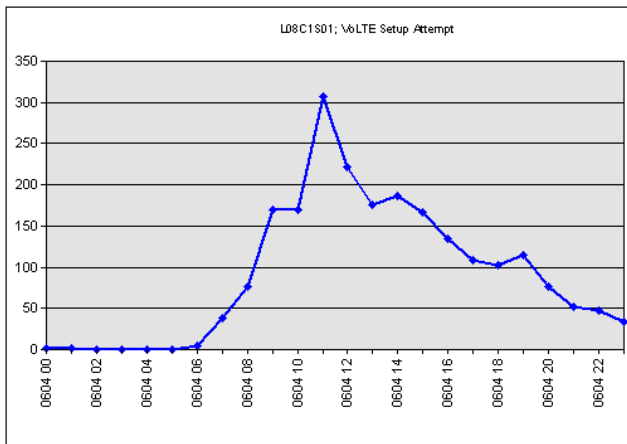
A TA 2 km-en belüli forgalmának arányát mutatja első három diagram, az utolsó három ábra pedig a 2 - 6 km-en belüli forgalom eloszlását szemlélteti az L800-as, L1800-as és az L2600-as cellára vonatkozólag.

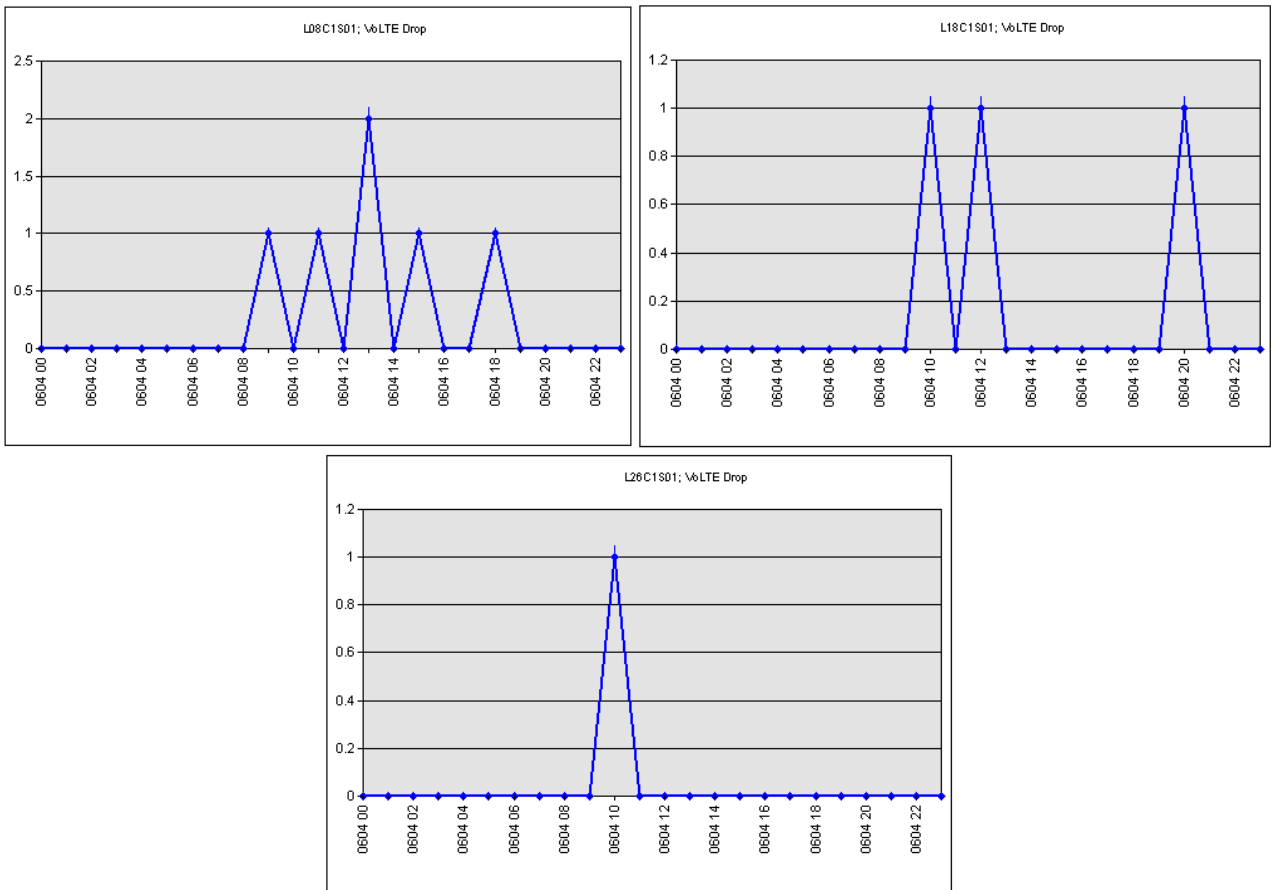


140. Ábra Timing Advance ((L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

23. Melléklet VoLTE setup-ra vonatkozó KPI-k

VoLTE setup kísérletek száma (1. - 3. diagram), és azok eldobása (4. - 6. diagram) látható a lentiekben az L800-ra, az L1800-ra és az L2600-ra vonatkozólag.

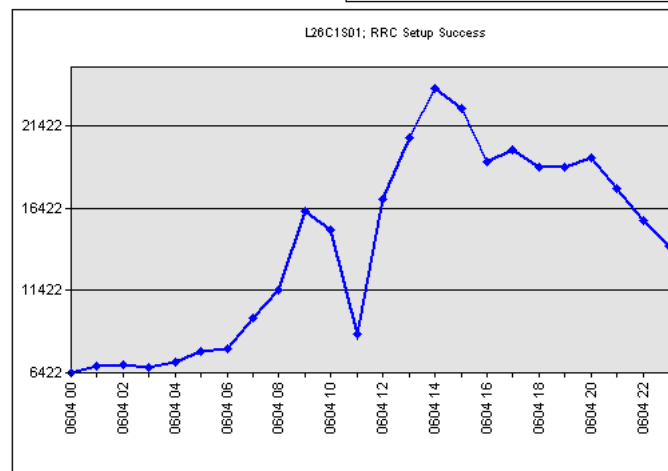
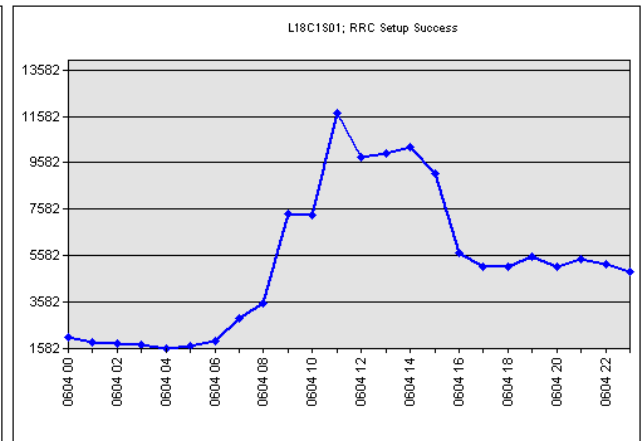
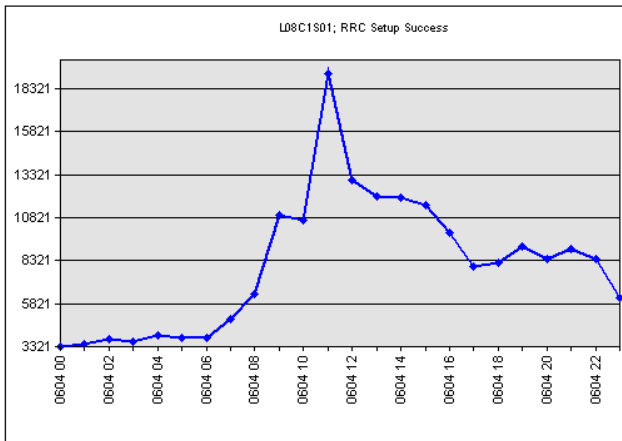
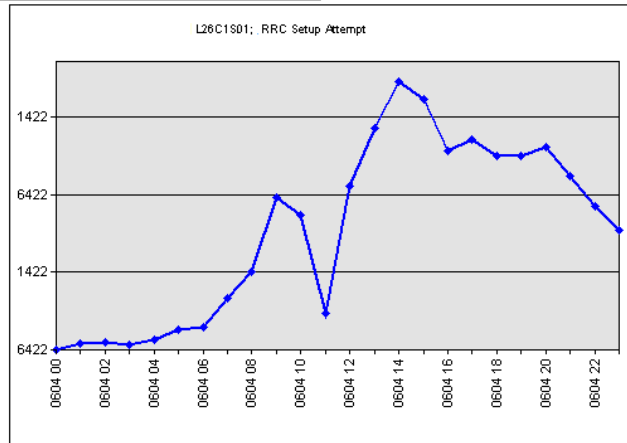
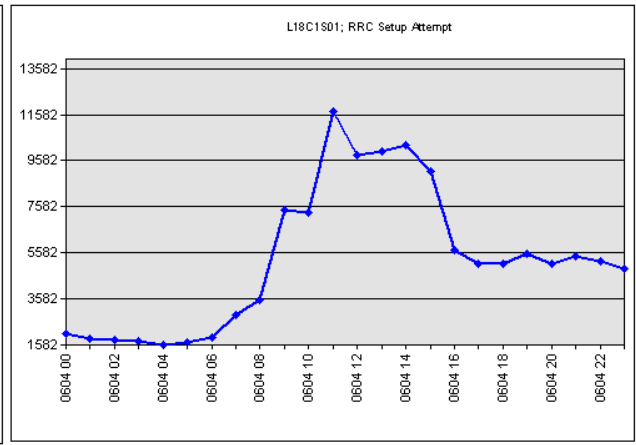
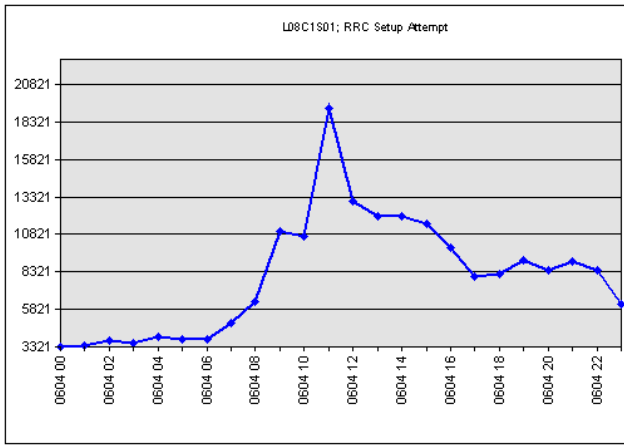




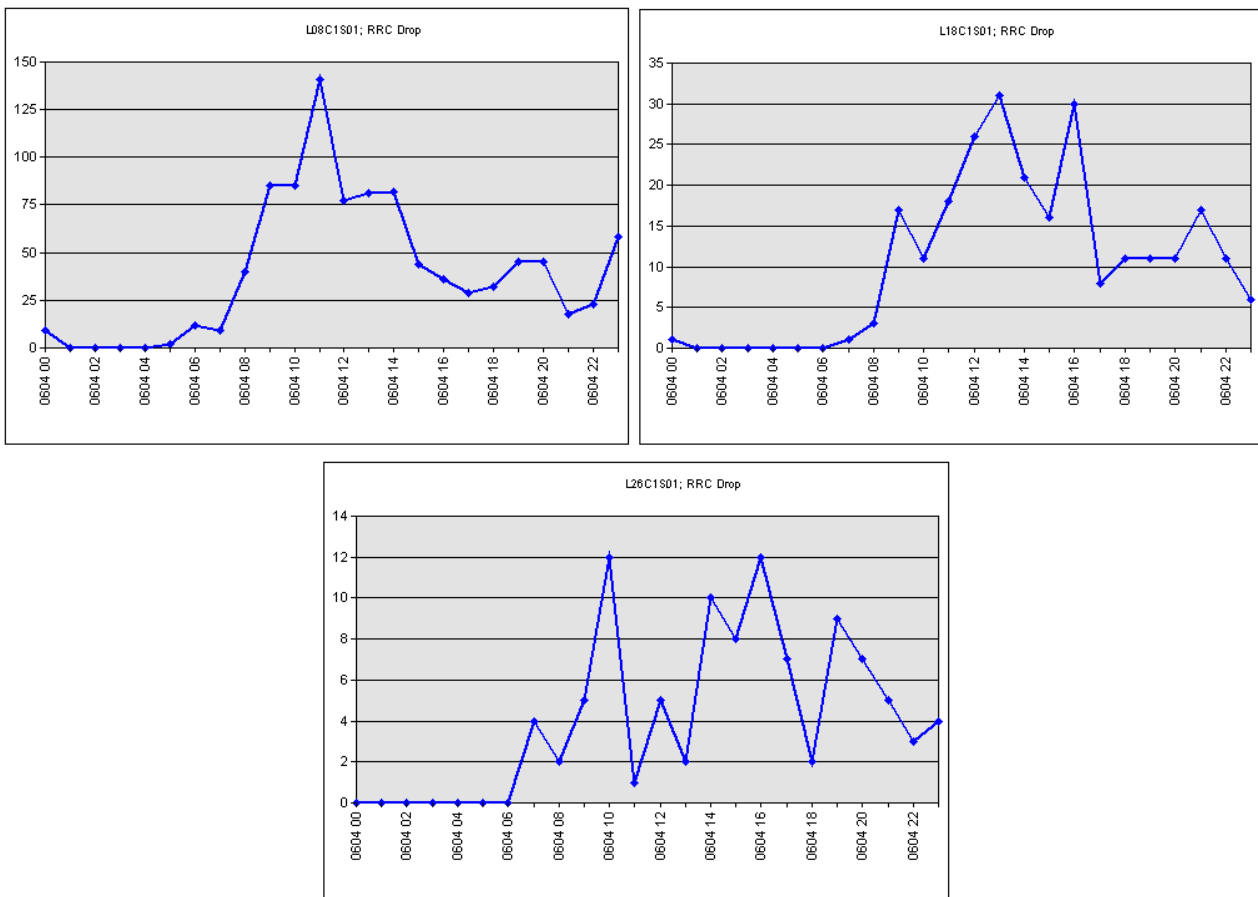
141. Ábra VoLTE setup kísérletek és drop-ok statisztikái (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

24. Melléklet RRC-re vonatkozó KPI-k

RRC setup kísérlet (1. - 3. diagram), sikeresség (4. - 6. ábra), valamint RRC drop-ok statisztikái (7. - 9.) az L800, L1800, L2600 vonatkozásában a lentiekben látható.



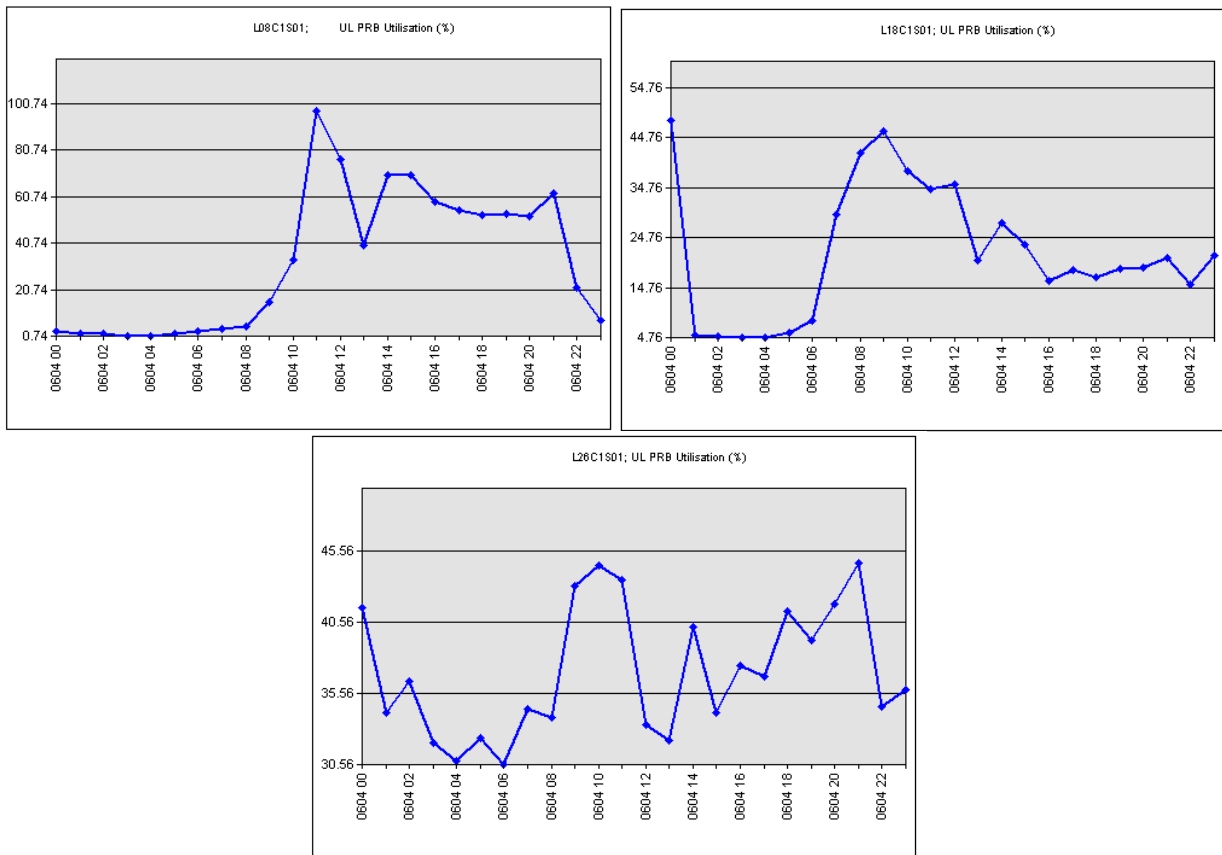
142. Ábra RRC setup kísérlet és sikeresség, valamint RRC drop-ok statisztikái (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]



143. Ábra RRC drop arány (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

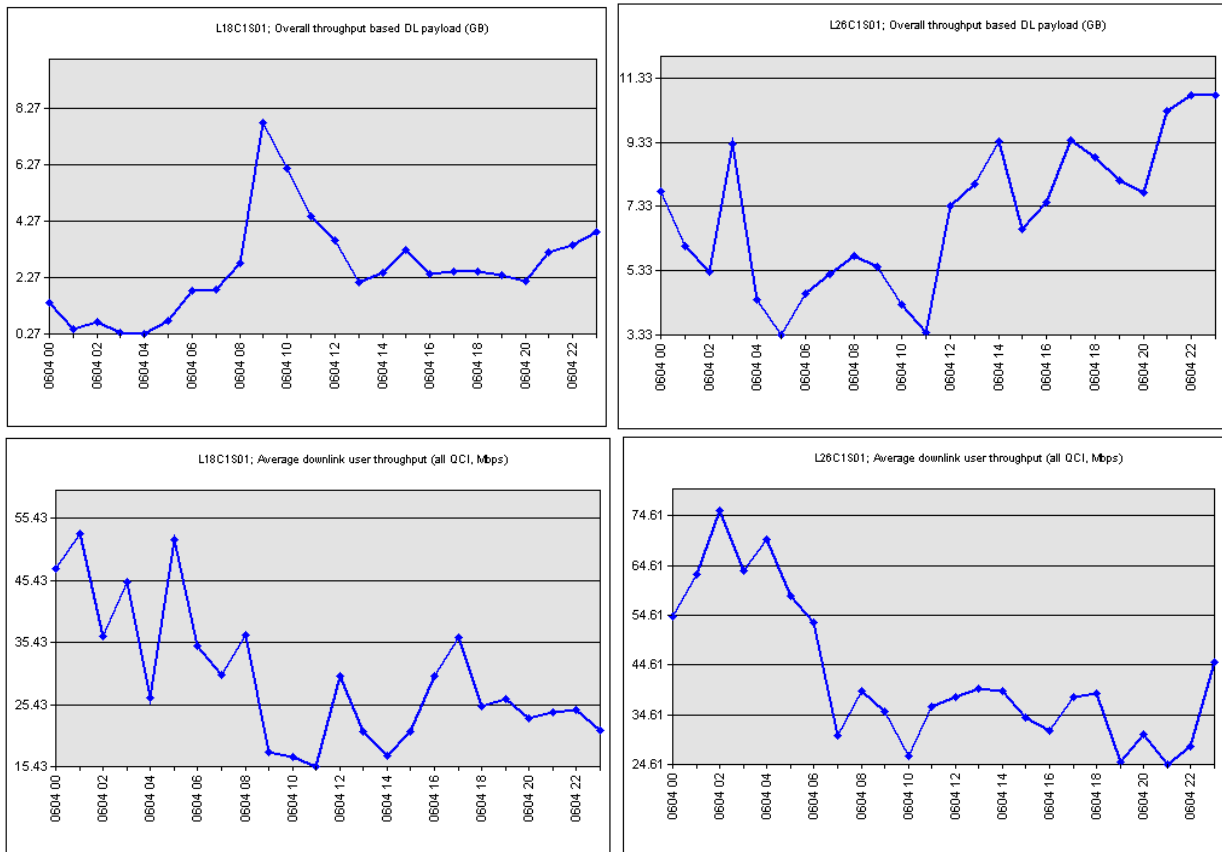
25. Melléklet Az uplink PRB mutatói

Az uplink PRB kihasználtságra vonatkozó KPI-k lentebb láthatóak (L800, L1800, L2600).



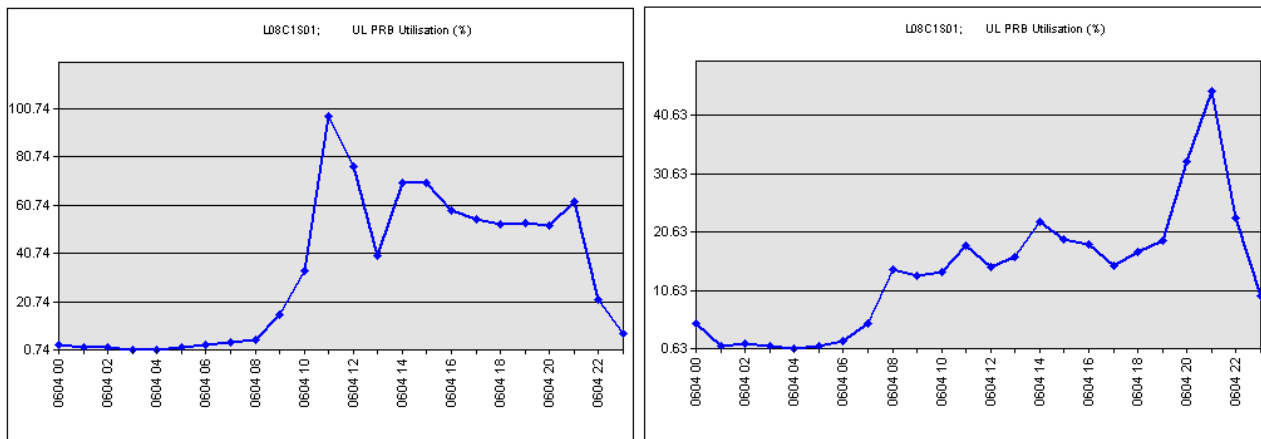
144. Ábra Uplink PRB kihasználtság (L800, L1800, L2600) [Forrás: mérési eredmény]

26. Melléklet Az L1800 és L2600 payload és throughput eredménye



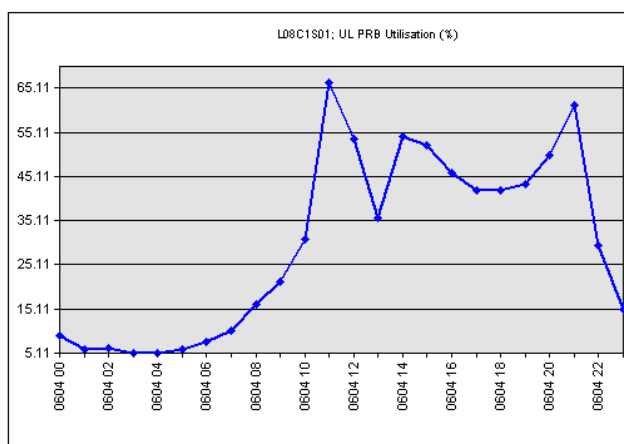
145. Ábra Fent az összes letöltési sebesség, lent az átlag adatátviteli sebesség (L18, L26) [Forrás: mérési eredmény]

27. Melléklet Az Uplink PRB a szimulált network sharing esetén



146. Ábra Uplink PRB kihasználtság a teljes kapacitását kihasználó cella statisztikája (bal oldalt) [Forrás: mérési eredmény]

147. Ábra Uplink PRB kihasználtság a szimulált operátor kevésbé terhelt 800-as cellája (jobb oldalt) [Forrás: mérési eredmény]



148. Ábra Uplink PRB kihasználtság a két cella számíttással való aggregációjával [Forrás: mérési eredmény]

28. Melléklet A 4G vészhelyzeti szimulációhoz alkalmazott mérési konfiguráció és EIRP számítás

Az LTE 800 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációját a következő táblázat mutatja.

21. Táblázat Az LTE 800 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációja [Forrás: saját szerkesztés]:

Magasság	Carrier	Antenna	Antennanyereség	Jumper csillapítás	RRU Teljesítmény	Moduláció	Antenna Mechanikus Dőlése	Antenna Elektronikus Dőlése
18-25 m	LTE 800 20 MHz	LDXX-6515DS-VTM	~17 dBi	0,5 dB	2x40 W/ 49 dBm (2x2 MiMo)	64 QAM	0°	7° ± 3°

Az állomások EIRP-jének kalkulációját a lentiek szerint alakul:

- $EIRP = [49 \text{ dBm} + 17 \text{ dBi} - 0,5 \text{ dB}] = 65,5 \text{ dBm}$

29. Melléklet A mért térerősségszintek a kijelölt teszterületen a bázisállomás lekapcsolása előtt és után

A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségszinteket a lenti táblázat foglalja össze a kiesett bázisállomás lekapcsolását megelőzően (a területi teljesülés relációjában).

22. Táblázat A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségszintek a kiesett bázisállomás lekapcsolását megelőzően a területi teljesülés relációjában [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	100.000%
2	-116.00	<=x<	-110.00	dBm	100.000%
3	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	100.000%
4	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	99.973%
5	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	98.501%
6	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	92.564%
7	-76.00	<=x<	0.00	dBm	59.511%

A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségszintjeit pedig a következő táblázat tartalmazza a kiesett bázisállomás lekapcsolását követően (a területi teljesülés relációjában).

23. Táblázat A kijelölt teszterületen belül beltérben mért térerősségszintek a kiesett bázisállomás lekapcsolását követően a területi teljesülés relációjában [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	100.000%
2	-116.00	<=x<	-110.00	dBm	99.947%
3	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	99.872%
4	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	92.222%
5	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	83.273%
6	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	73.694%
7	-76.00	<=x<	0.00	dBm	45.955%

30. Melléklet A mérési konfiguráció, valamint a terület beépítettsége

Az GSM 900 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációját a lentiekben mellékelem, a táblázat minden használt bázisállomásra vonatkozik ebben a szimulációban is, kizárólag az antennamagasságok és elektronikus dőlések különböznek az egyes site-ok tekintetében.

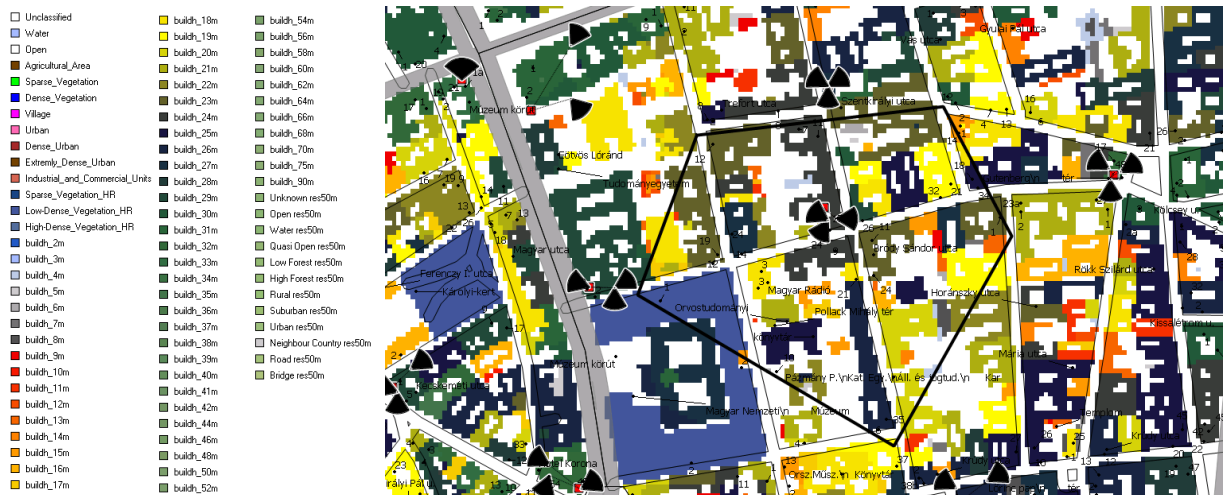
24. Táblázat Az GSM 900 vizsgálathoz alkalmazott bázisállomások celláinak konfigurációja [Forrás: saját szerkesztés]:

Magasság	Carrier	Antenna	Antennanyereség	Jumper csillapítás	RRU Teljesítmény	Antenna Mechanikus Dőlése	Antenna Elektronikus Dőlése
18-25 m	GSM 900	LDXX-6515DS-VTM	~16,5 dBi	0,5 dB	40 W / 46 dBm	0°	7° ± 3°

Az állomások EIRP-jének kalkulációját a lentiek szerint alakul:

- $EIRP = [46 \text{ dBm} + 17 \text{ dBi} - 0,5 \text{ dB}] = 62,5 \text{ dBm}$

A terület épületbeépítettségét a következő ábra szemlélteti (clutter adatbázis).



149. Ábra Az GSM 900 vizsgálathoz alkalmazott teszterület beépítettségének adatbázisa [Forrás: saját szerkesztés]

31. Melléklet A lekapcsolást megelőzően és azt követően mért statisztikák

A GSM teszterületen készült statisztika a tapasztalható jelszintekre vonatkozólag a lekapcsolást megelőzően a lenti táblázatban látható. A táblázat azt szemlélteti, hogy a terület hány %-ban teljesül az adott kategória/teljesítményszint.

25. Táblázat GSM teszterületen készült statisztika a tapasztalható jelszintekre a lekapcsolást megelőzően [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-110.00	<=x<	-102.00	dBm	100 %
2	-102.00	<=x<	-94.00	dBm	100 %
3	-94.00	<=x<	-85.00	dBm	88.305%
4	-85.00	<=x<	-80.00	dBm	69.446%
5	-80.00	<=x<	-74.00	dBm	65.401%
6	-74.00	<=x<	-62.00	dBm	63.260%
7	-62.00	<=x<	0.00	dBm	61.617%

A vészhelyzetre kandidált bázisállomás lekapcsolását követően mért statisztika a lenti táblázatban található.

26. Táblázat GSM teszterületen készült statisztika a tapasztalható jelszintekre a lekapcsolás után [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-110.00	<=x<	-102.00	dBm	87.372%
2	-102.00	<=x<	-94.00	dBm	87.372%
3	-94.00	<=x<	-85.00	dBm	80.773%
4	-85.00	<=x<	-80.00	dBm	64.024%
5	-80.00	<=x<	-74.00	dBm	62.168%
6	-74.00	<=x<	-62.00	dBm	61.326%
7	-62.00	<=x<	0.00	dBm	58.326%

32. Melléklet 2G/4G bázisállomás kiesésének szimulációjához használt mérési elrendezés

Az alábbiakban mellékelem a 2G és 4G bázisállomás kiesésének szimulációjához használt mérési elrendezést.

27. Táblázat 4G és 2G bázisállomás kiesésének szimulációjához használt mérési elrendezést [Forrás: saját szerkesztés]:

Site-ok	TFM	AM	Effektív magasság	Carrier	Cella	Antenna	Irány	RRU Teljesítmény	Antenna Mech. Dőlése	Antenna Elektr. Dőlése
Keleti Site	273 m	55 m	328 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDXX-6516DS-VTM	30 °	2x40W (2x2 MiMo)	0°	1°
					2-es szektor		110 °		0°	8°
					3-as szektor		230 °		2°	5°
				GSM 900	1-es szektor	Andrew LDXX-6516DS-VTM	30 °	40 W	0°	2°
					2-es szektor		110 °		0°	5°
					3-as szektor		230 °		2°	5°
Lekapcsolandó Site	242 m	29 m	271 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Kathrein 80010698	80 °	2x40W (2x2 MiMo)	0°	4°
					2-es szektor		150 °		0°	5°
					3-as szektor		220 °		0°	8°
					4-es szektor		320 °		0°	4°
				GSM 900	1-es szektor	Kathrein 80010698	80 °	40 W	0°	3°
					2-es szektor		150 °		0°	4°
					3-as szektor		220 °		0°	7°
					4-es szektor		320 °		0°	3°
Nyugati Site	239 m	30 m	269 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX-6515DS-VTM	30 °	2x40W (2x2 MiMo)	0°	5°
					2-es szektor		120 °		5°	7°
				GSM 900	1-es szektor	Andrew LDX-6515DS-VTM	30 °	40 W	0°	5°
					2-es szektor		120 °		5°	7°

33. Melléklet 4G beltéri jelszintek statisztikája beltérben az állomás lekapcsolása előtt

A vészhelyzeti esemény szimulálását megelőző állapotban mérhető 4G beltéri jelszintek mértéke a teszterületen a következő táblázatban található.

28. Táblázat Jelszintek megléte a teszterületen kategóriákra bontva, beltérben mérve [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	100,000%
2	-116.00	<=x<	-110.00	dBm	100,000%
3	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	100,000%
4	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	99,960%
5	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	99,141%
6	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	92,906%
7	-76.00	<=x<	0.00	dBm	62,898%

34. Melléklet 4G beltéri jelszintek statisztikája beltérben az állomás lekapcsolása után

A vészhelyzeti esemény szimulálását követően a bázisállomás lekapcsolását követően mérhető 4G beltéri jelszintek mértéke a teszterületen a következő táblázatban található.

29. Táblázat Jelszintek megléte a tesztteterületen kategóriákra bontva, beltérben mérve a lekapcsolást követően [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	99,753%
2	-116.00	<=x<	-110.00	dBm	98,295%
3	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	95,285%
4	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	77,049%
5	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	57,624%
6	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	37,383%
7	-76.00	<=x<	0.00	dBm	5,269%

35. Melléklet 2G bázisállomás kiesésének statisztikája

A tesztteterületen mért beltéri jelszintek statisztikáját a lenti táblázat foglalja össze.

30. Táblázat A tesztteterület hálózat jelszintjei a vészhelyzetben érintett bázisállomás lekapcsolását követően [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-110.00	<=x<	-102.00	dBm	99.416%
2	-102.00	<=x<	-94.00	dBm	98.772%
3	-94.00	<=x<	-85.00	dBm	97.443%
4	-85.00	<=x<	-80.00	dBm	92.537%
5	-80.00	<=x<	-74.00	dBm	86.551%
6	-74.00	<=x<	-62.00	dBm	75.017%
7	-62.00	<=x<	0.00	dBm	32,748

36. Melléklet A városi területek analizéséhez használt konfiguráció OP. 1, Op.2 és Op.3 bázisállomásaira vonatkozólag

Az Op. 1 bázisállomásának konfigurációja alább látható, különálló 1 XPOL-os antennát alkalmaztam mind a GSM, mind pedig az LTE tekintetében.

31. Táblázat Op.1 mérési konfigurációja [Forrás: saját szerkesztés] [Forrás: saját szerkesztés]:

Op.szám	TFM	AM	Effektív magasság	Carrier	Cella	Antenna	Írány	RRU Teljesítmény	Antenna Mech. Dőlése	Antenna Elektr. Dőlése
Op 1	170 m	60 m	230 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX-6516DSP- VTM	5 °	2x40W (MiMo)	0°	6°
					2-es szektor		100 °		0°	4°
					3-as szektor		220 °		0°	3°
				GSM 900	1-es szektor	Andrew LDX-6516DSP- VTM	5 °	40 W	0°	5°
					2-es szektor		60 °		0°	6°
					3-as szektor		205 °		0°	2°

Op. 2 antennaelrendezése a lenti táblázatban található. Különálló 1 XPOL-os antennát használtam a GSM-hez és az LTE-hez az Andrew LDX-6516 DSP-VTM-et illetően (Site 2 esetén), valamint 3 XPOL-os antennát vettem igénybe Site 1-hez (Kathrein 80010699), amelynek alsó két ágát használom ki a szimuláció során.

32. Táblázat Op.2 mérési konfigurációja [Forrás: saját szerkesztés]:

Op. Num	TF M	Magasság	Effektív magasság	Carrier	Cella	Antenna	Irány	RRU Teljesítmény	Antenna Mech. Dőlése	Antenna Elektr. Dőlése
Operátor 2 Site 1	135 m	30 m	165 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Kathrein 80010699 XPOL 790-862 MHz	5 °	2x40W (MiMo)	0°	4°
					2-es szektor		110 °		3°	4°
					3-as szektor		260 °		0°	2°
				GSM 900	1-es szektor	Kathrein 80010699 XPOL 880-960 MHz	5 °	40 W	0°	4°
					2-es szektor		110 °		0°	6°
					3-as szektor		260 °		0°	1°
Operátor 2 Site 2	96 m	23 m	119 m	LTE 800	1-es szektor	Andrew LDX-6516DSP-VTM	5 °	2x40W (MiMo)	0°	6°
					2-es szektor		100 °		0°	4°
					3-as szektor		220 °		0°	6°
				GSM 900	1-es szektor	Andrew LDX-6516DSP-VTM	5 °	40 W	0°	5°
					2-es szektor		60 °		0°	6°
					3-as szektor		205 °		0°	1°

A 3-as operátor bázisállomásának konfigurációit a lenti táblázat tartalmazza:

33. Táblázat Op.3 mérési konfigurációja [Forrás: saját szerkesztés]:

Op. Num	TF M	Magasság	Effektív magasság	Carrier	Cella	Antenna	Irány	RRU Teljesítmény	Antenna Mechanikus Dőlése	Antenna Elektronikus Dőlése
Operátor 3	130 m	30 m	160 m	LTE 800	1-es szektor	Huawei ATR451606_0806	40 °	2x40W (MiMo)	0°	4°
					2-es szektor		120 °		0°	8°
					3-as szektor		265 °		0°	2°
				GSM 900	1-es szektor	DBXDH-6565B-VTM	45 °	40 W	0°	3°
					2-es szektor	739622	135 °		0°	6°
					3-as szektor	739660	265 °		0°	2°

37. Melléklet A vidéki területek analizéséhez használt konfiguráció OP. 1, Op.2 és Op.3 bázisállomásaira vonatkozólag

A szimulációhoz használt antennák 1 XPOL-osak az Andrew LDX-6516 DSP-VTM és a Kathrein 90010456V02 (30 fokos vertikális sugárzás) tekintetében, valamint 3 XPOL-os antennákat használtam a Kathrein 80010699-es vonatkozásában, melynek alsó (800-as ágát) használom a szimuláció során. A bázisállomás konfigurációja lentebb látható.

34. Táblázat Az alkalmazott bázisállomások konfigurációi [Forrás: saját szerkesztés]:

Site Num.	Op. Num	TFM	Magasság	Effektív magasság	Carrier	Cella	Antenna	Írány	RRU Teljesítmény	Antenna Mech. Dőlése	Antenna Elektr. Dőlése
Site 1	Op 1, 2, 3	261 m	30 m	291 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX-3316DS-VTM	95 °	2x40W (MiMo)	0°	6°
						2-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	215 °		0°	6°
						3-as szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	350 °		0°	4°
Site 2	Op 1, 2, 3	220 m	40 m	260 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	115 °	2x40W (MiMo)	0°	2°
						2-es szektor	Andrew LDX-3316DS-VTM	230 °		0°	8°
						3-as szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	305 °		0°	7°
Site 3	Op 1, 2, 3	219 m	50 m	259 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	20 °	2x40W (MiMo)	0°	4°
						2-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	170 °		6°	2°
						3-as szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	290 °		0°	2°
Site 4	Op 1, 2, 3	225 m	23 m	248 m	LTE 800 20 MHz	1-es és 2-es szektor splitter	Andrew LDX 65113DS-VTM	0°	2x40W (MiMo)	3°	0°
						1-es és 2-es szektor splitter	Andrew LDX 65113DS-VTM	180 °		3°	0°
Site 5	Op 1, 2, 3	259 m	43 m	302 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	55 °	2x40W (MiMo)	0°	3°
						2-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	190 °		0°	2°
						3-as szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	310 °		0°	3°
Site 6	Op 1, 2, 3	225 m	53 m	278 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	0 °	2x40W (MiMo)	0°	3°
						2-es szektor	Andrew LDX 6516DS-VTM	155 °		0°	2°
						3-as szektor	Kathrein 800100456V02	240 °		0°	3°
Site 7	Op 2	232 m	50 m	287 m	LTE 800 20 MHz	1-es szektor	Kathrein 80010699	30 °	2x40W (MiMo)	0°	2°
						2-es szektor	Kathrein 80010699	190 °		0°	2°
						3-as szektor	Kathrein 80010699	280 °		0°	3°

38. Melléklet RSRP statisztika az 1-es és 3-as, valamint a 2-es operátor szemszögéből

RSRP értékek statisztikái a 1-es és 3-as (kék és feketével jelölt) szolgáltató hálózatában mérve, az adott kategória teljesülésével a következő táblázatban található. A lenti kategóriákon felüli százalékarány -126 dBm alatti értéket vett fel, ezt a táblázat már nem tartalmazza.

35. Táblázat RSRP értékek a 1-es és 3-as (kék és feketével) jelölt szolgáltató hálózatában mérve [Forrás: saját szerkesztés]:

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	20,26%
2	-116.00	<=x<	-114.00	dBm	7,21%
3	-114.00	<=x<	-110.00	dBm	18,43%
4	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	40,11%
5	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	8,06%
6	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	0,80%
7	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	0,00%
8	-76.00	<=x<	0.00	dBm	0,00%

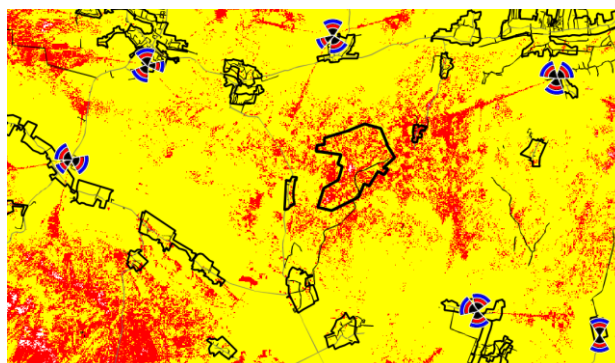
RSRP értékek statisztikái a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató hálózatában mérve, az adott kategória teljesülésével a következő táblázatban található.

36. Táblázat RSRP értékek a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató hálózatában mérve [Forrás: saját szerkesztés]

Kategória	Felső érték	Reláció	Alsó érték	Dimenzió	Teljesül a terület X %-ban
1	-126.00	<=x<	-116.00	dBm	0,13%
2	-116.00	<=x<	-114.00	dBm	0,20%
3	-114.00	<=x<	-110.00	dBm	1,07%
4	-110.00	<=x<	-100.00	dBm	6,45%
5	-100.00	<=x<	-94.00	dBm	6,84%
6	-94.00	<=x<	-88.00	dBm	17,75%
7	-88.00	<=x<	-76.00	dBm	32,22%
8	-76.00	<=x<	0.00	dBm	35,34%

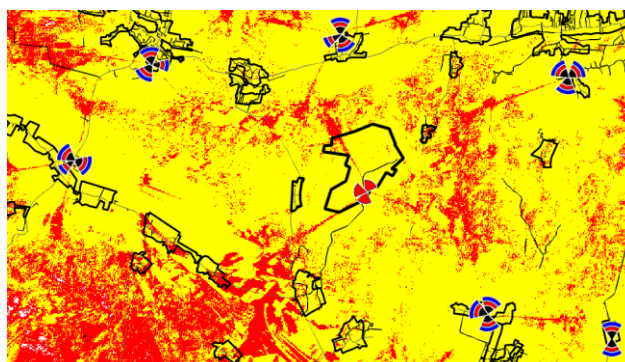
39. Melléklet RSRQ értékek szimulációja

RSRQ alakulását a lenti predikciók szemléltetik, pirossal jelölve a szuboptimális RSRQ értékek. Az 1-es és 3-as (kék és feketével jelölt) szolgáltató szemszögéből mért RSRQ szimuláció alább látható:



150. Ábra RSRQ plot 1-es és 3-as (kék és feketével jelölt) szolgáltató szemszögéből azonos antennakonfigurációkat feltételezve [Forrás: saját szerkesztés]

RSRQ predikció a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató szemszögéből a lenti predikción látható:



151. Ábra RSRQ plot a 2-es (pirossal jelölt) szolgáltató szemszögéből, a közös bázisállomásokon azonos antennakonfigurációkat feltételezve [Forrás: saját szerkesztés]

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm szépen Konzulensemnek, Dr. Maros Dórának, családomnak, különösképpen Édesapámnak, Dr. Temesvári Zsoltnak, valamint Tanárimnak, Barátaimnak, mindenkori Kollégáimnak és a Doktori Iskolának.