



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Ratkóczy Péter

**OPTIMÁLIS HETEROGÉN
MOBIL HÁLÓZATI
ARCHITEKTÚRÁK ELTÉRŐ
FORGALMI
KÖVETELMÉNYEK MELLETT**

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

KONZULENS

Dr. Mitcsenkov Attila

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	6
1.1 Célkitűzések	7
1.2 Technológiai háttér	8
1.2.1 LTE	8
1.2.2 Kiscellás rendszerek	8
1.2.3 IEEE 802.11a (Wi-Fi)	9
1.3 Heterogén mobil hálózatok	10
2 Rádiós sávzélesség igény meghatározása	10
2.1 Gömbsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása	11
2.2 Szektorsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása	14
2.3 SINR meghatározása beltéri felhasználók esetén	17
2.4 Jelterjedési modell	17
2.5 A spektrális hatékonyság kiszámítása	18
2.6 MIMO (multiple-input and multiple-output)	21
3 Heterogén hálózat méretezése	23
3.1 A vizsgált terület térbeli eloszlása	23
3.2 Forgalmi terhelés szimulációja	23
3.2.1 A modell alapkoncepciója	23
3.2.2 Kültéri felhasználók térbeli eloszlása	24
3.2.3 Beltéri felhasználók térbeli eloszlása	25
3.3 A kültéri bázisállomások elhelyezése	25
3.4 A beltéri piko bázisállomások és a Wi-Fi AP-ok elhelyezése	27
3.5 Hálózati modellek, felhasználók bázisállomáshoz rendelése	28
3.5.1 LTE makro- és kiscellás heterogén hálózati modell	28
3.6 Beltéri és kültéri felhasználók bázisállomásokhoz való rendelése	33
3.6.1 A hiba meghatározása	35
4 Implementáció	36
5 Eredmények	37
5.1 Bemeneti paraméterek definiálása	37
5.2 Méretezés eredménye, beltéri felhasználók számának hatása	38
5.3 Költségek összehasonlítása	43

5.4	A méretezés hatására történő spektrális hatékonyság változás.....	45
6	Kitekintés, az 5G hálózat forgalmi igénye	47
7	Összegzés.....	49
8	Irodalomjegyzék.....	51
9	Ábrajegyzék.....	53
10	Táblázatjegyzék	55

Kivonat

Az elmúlt években tapasztalt mobil adatforgalom növekedése miatt a rádiós hozzáférési hálózatot már nem elegendő lefedettségre, hanem forgalmi kapacitásra kell méreteznünk.

A növekvő forgalmi kapacitás kiszolgálásának egyik módja a bázisállomások egyre sűrűbb elhelyezése, azonban különösen nagyvárosi környezetben ez korlátokba ütközik. Ennek a problémának az egyik lehetséges megoldása a heterogén mobil hálózat (HetNet) alkalmazása: ez esetben több különböző vezeték nélküli technológia együttesen kezeli a mobil adatforgalmat.

Dolgozatomban azt kerestem, hogy egy adott fizikai elrendezés (épületek, utcák) és adott forgalmi terhelés mellett melyik HetNet architektúra lenne az ideális. Vizsgáltam, hogy hogyan változnak a méretezési eredmények, ha a jelenlegi makrocellás hálózatot kiscellákkal illetve Wi-Fi-vel egészítem ki. A méretezési eredményekre költségmodellt húztam rá, amely alapján már rangsorolni lehetett a különböző architektúrákat a kiépítési költségük alapján. A dolgozat megpróbál egy kitekintést adni az 5G mobil hálózatok jelenleg formálódó forgalmi igényeinek vizsgálatára is, amely előreláthatólag nagy hangsúlyt fektet a heterogén mobil hálózatok teherbírására.

A méretező modult MATLAB környezetben implementáltam. A modul képes a különböző vezeték nélküli technológiák együttes méretezésére, figyelembe véve a kültéri és beltéri felhasználókat, a technológiára jellemző jelterjedési modelleket, a hálózatban keletkező káros interferenciák hatásait, földrajzi környezet jellemzőit (nagyváros, város, vidék) és a területre jellemző forgalmi kapacitásmintát. A méretezésnél alkalmazott forgalmi minta több paraméter segítségével állítható (beltéri és kültéri felhasználók térbeli eloszlása, felhasználók forgalmi igényei), így lehet vizsgálni a különböző paraméterek változtatásának a hatását.

Abstract

The experienced mobile traffic increase in the recent years caused significant changes in network dimensioning, as the traffic capacity became the bottleneck instead of the coverage constraints, calling for higher density of the base stations, even though there are practical bounds for network deployment density. One possible solution to this problem is the application of heterogeneous mobile networks (HetNet), which is a special combination of various wireless technologies.

In my study I am looking for the best HetNet architecture solution in given physical topology (buildings, streets) and traffic demand. I have analyzed the changing of the dimensioning results in case of adding small cell or Wi-Fi with the current macro network. I fitted a cost model on the dimensioning results which can help to grade the different architecture based on the CAPEX. This study tries to give a future vision about the 5G mobile network traffic demand wherein the traffic demand of HetNet will be crucial.

I have implemented the dimensioning modul in MATLAB environment. The modul can joint dimension the different wireless mobile technology and take into consideration the indoor and outdoor users, the technology specific radio propagation models, the interference in the network and the characteristics of the physical area (dense urban, urban, rural). The traffic capacity requirements to be met by the radio network are fine-tuned by several parameters (user's spatial distribution, the user capacity demand).

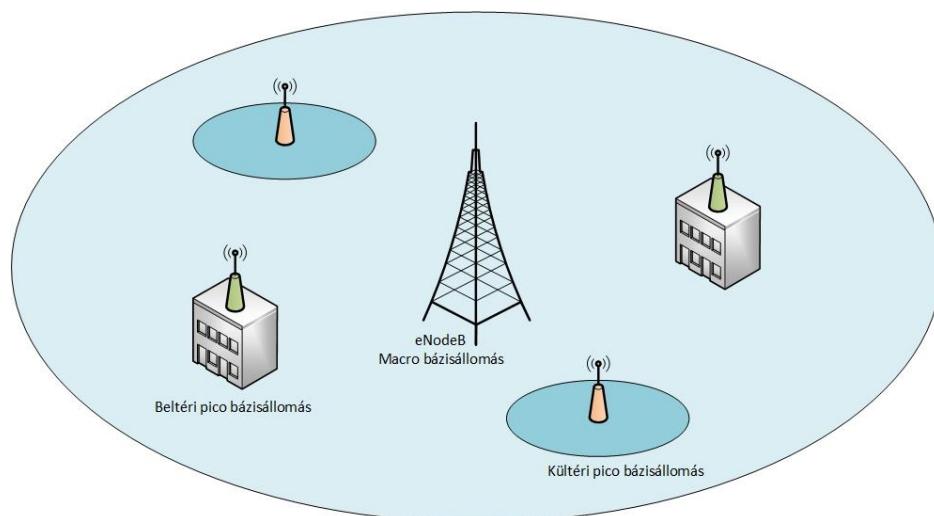
1 Bevezetés

A mobil sávszélességi igények exponenciálisan nőnek, és a szolgáltatók számára kihívást jelent ezen igények kielégítése. A Cisco felmérése szerint az okostelefonok által generált adatforgalom 2010-től 2011-ig megháromszorozódott (most 150 Mbit/hónap), és a teljes mobil-adat forgalom 2011 és 2016 között 18-szorosára fog nőni. [1]

A növekvő mobil sávszélességi igények kiszolgálásának egyik módja a mobil bázisállomások egyre sűrűbben való elhelyezése. Ez a módszer egy bizonyos sűrűség elérése után nem fog működni, hiszen sok helyen korlátokba ütközik a bázisállomások elhelyezése.

Egy másik megoldás, a már működő mobil hálózat olyan más technológiával való kiegészítése, amelyek elsődleges feladata a mobil adatforgalom kezelése, nem pedig a lefedettség biztosítása. Az ilyen típusú hálózatokat heterogén hálózatoknak (HetNet) nevezik [3] [4]. Két ilyen kiegészítő technológia, amelyet én is használtam a dolgozatomban, a kis cellás rendszerek (small cell) és a Wi-Fi technológia. Mivel többféle Wi-Fi hálózat létezik, választásom az IEEE 802.11a szabványra esett. Ezeket a „kiegészítő” technológiákat el lehet helyezni az épületekben (indoor) illetve kültéren (outdoor), hasonló módon, ahogy a makro bázisállomásokat is.

Az alábbi ábrán látható a heterogén hálózatok koncepciója:



1. ábra Heterogén mobil hozzáférési hálózat

A korábbiakban már foglalkoztam heterogén hozzáférési hálózat méretezésével, azonban akkor csak kültéri felhasználók jelentek meg a számításaimban. [6] [7]

Korábbi kutatásaimban megállapítottam, hogy a kültéren megnövekedett kapacitásigény kiszolgálására a kis cellás rendszer jobb választás lehet, mivel a kis cellás rendszerek hatósugara nagyobbak adódik, mint a Wi-Fi hotspotoké.

A következő alfejezetekben röviden ismertetem célkitűzéseimet és a három vezeték nélküli technológiát, amelyeket használtam a méretezésnél. A 2. fejezetben az SINR (Signal-to-interference-plus-noise ratio) fogalmát, fontosságát, illetve különböző antenna elrendezés mellett a kiszámítási módját ismertetem. Bemutatom, a rádiós jelterjedési modellt, amit használtam, illetve, hogy hogyan lehet kapcsolatot teremteni LTE és Wi-Fi hálózatoknál az SINR és a spektrális hatékonyság között. Ismertetem, hogy az egyre szélesebb körben elterjedt MIMO (Multiple Input Multiple Output, avagy a többutas terjedés kihasználása) milyen hatással van a hálózat méretezésére. A 3. fejezetben a heterogén hálózati méretező modellel ismertetem. Bemutatom az implementációban használt Monte Carlo szimuláció és a bázisállomások illetve a hozzáférési pontok elhelyezésének koncepcióját, majd a heterogén mobil hozzáférési hálózati modell részleteit. A 0. fejezetben a modul implementációját mutatom be röviden. Az 0. fejezetben az eredményeket ismertetem. Különböző kapacitásparaméterek mellett végzek méretezést, majd a költségfüggvény segítségével hasonlítom össze a különböző architektúrákat. A 0. fejezetben egy kitekintéssel mutatom be az 5G-s mobil hálózatok forgalmi igényeit, illetve a méretezésre vonatkozó fontosabb paramétereit. Az utolsó fejezet pedig egy összeggzéssel zárja be a dolgozatot.

1.1 Célkitűzések

Méretezési feladatoknál fontos a bemeneti paraméterek és a kimeneti értékek pontos meghatározása. Munkám során egy olyan kül- és beltéri méretező modult készítettem, amely technológiai, földrajzi és kapacitásra vonatkozó bemeneti adatok segítségével meghatározza, hogy egy adott területre, adott épületelrendezés mellett hány LTE makro bázisállomás és kültéri LTE kis cella, illetve beltéri Wi-Fi hozzáférési pont (AP) vagy LTE kis cella szükséges.

Az elkészült méretezési modul segítségével számításokat végeztem különböző kapacitássűrűségek mellett. A kapott eredmények és egy költségfüggvény segítségével

pedig elemezni tudtam a különböző konfigurációk költségeit egy adott kapacitássűrűség mellett. Vizsgáltam továbbá, hogy a beltéri felhasználók és a kültéri felhasználók arányának változtatása milyen hatással van a méretezés eredményére.

Mind a forgalmi igények, mind a technológiai megoldások terén a rövid távú (kb. 2020-ig tartó) előretekintésre törekedtem, így a várhatóan eddigre széles körben elterjedő LTE technológiai konfigurációkat vizsgáltam a várható forgalomsűrűségek mellett. A dolgozat végén azonban egy rövid kitekintést adok az 5G mobil hálózatok jelenleg formálódó (jelentősen magasabb) forgalmi igényeinek vizsgálatára is, és bemutatom, hogy ezek az igények mit jelentenek a méretezés szempontjából.

1.2 Technológiai háttér

Ebben az alfejezetben röviden ismertetem azokat a vezeték nélküli technológiákat, amelyeket a méretezés során használtam.

1.2.1 LTE

Az LTE (Long Term Evolution) egy új, negyedik generációs mobil adatátviteli szabvány, amelyet a 3GPP Release 8 írt le. Az LTE számos követelménynek kell eleget tennie. Ilyen a sáv szélesség, amelynél lefelé 100 Mb/s-ot, felfelé 50 Mb/s-ot kell teljesítenie, továbbá FDD (Frequency-Division Duplexing) és TDD (Time-Division Duplexing) támogatást kell biztosítania, és a csomagkésleltetés a rádiós hozzáférési hálózatban nem haladhatja meg az 5 ms-ot. 5 MHz-en egyszerre legalább 200 előfizetőt kell kiszolgálnia egy cellában, és lehetővé kell tennie a korábbi hálózatokkal való együttműködést.

Jelentős változások jelentek meg a kódolásban is. Míg a letöltési ágban OFDMA-t (Orthogonal frequency-division multiplexing) használnak, a letöltés SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Acces), más néven DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM). Ezek segítségével a sáv szélességet rugalmasan lehet használni és a megvalósítása is egyszerűbb. [8] [9]

1.2.2 Kiscellás rendszerek

A kis cellás rendszereknek több típusa létezik. Beszélhetünk mikro-, piko-, és femtocelláról. A kis cellák alapkonceptiója, hogy az adóteljesítmény jóval kisebb,

ezáltal maga a bázisállomás által lefedett terület is nagymértékben lecsökken. Kiegészítő technológiának használják olyan területeken, ahol vagy nagyon rossz a lefedettség vagy a kapacitás igények jóval nagyobbak, mint amit a makro bázisállomás ki tud szolgálni. A mikrocella ezek közül a legnagyobb területet fedi le. A pikocella a második legkisebb kis cellás rendszer. Hatósugara nagyságrendileg 50 és 100 m között változik. A pikocellák és a femtocellák között lényeges különbség, hogy a pikocellákat a szolgáltatók telepítik és üzemeltetik. A pikocellák a lefedettséget biztosító makrocellák mellett a forgalmi igények kiszolgálását lehetővé tevő kiegészítő megoldás.

A femtocellák sugara 10 és 20 m között változik. Ezeket a felhasználók saját maguk vásárolják meg, helyezik üzembe és üzemeltetik. Főként olyan helyekre szükséges a telepítésük, ahol nem megfelelő a jelszint (pl. pince) és a felhasználó szeretné, hogy ott is legyen megfelelő lefedettség.[10] [11]

1.2.3 IEEE 802.11a (Wi-Fi)

Az IEEE a 90-es években elkezdett egy olyan megoldást kifejleszteni, amely alkalmas az Ethernet (802.3) előnyös tulajdonságait vezeték nélküli közegben megvalósítani. Ennek az eredménye lett az IEEE 802.11 (vezetékmentes Ethernet). Az IEEE 802.11 több Wi-Fi szabványt definiál: 802.11a/b/g/n/ac/ad. Ezek különböző frekvenciasávokban működhetnek és különböző modulációt is használhatnak.

A következő táblázatban összefoglalom a különböző szabványok fontosabb tulajdonságait:

	Működési frekvencia (GHz)	Maximális sebesség	Moduláció
802.11a	5	54 Mb/s	OFDM
802.11b	2,4	11 Mb/s	DSSS
802.11g	2,4	54 Mb/s	OFDM, DSSS
802.11n	2,4 és 5	600 Mb/s	OFDM
802.11ac	5	1,3 Gb/s	OFDM

1. táblázat IEEE 802.11 szabvány fontosabb tulajdonságai

Az IEEE 802.11a szabvány egy vezeték nélküli adatátviteli protokoll. Az OSI modellben található két legalsó réteget definiálja: fizikai és adatkapcsolati réteg.

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) modulációt használ, amely egy többvívős megoldás. 1999-ben definiálták az eredeti szabványt, amely az 5 GHz-es sávban működik, 52 alvívót használ és az elméleti legmagasabb adatsebesség 54 *Mbit/s*.

A 802.11a-ban 12 nem átlapolódó csatornát lehet létrehozni. Ez azért fontos, mert ebben az esetben ezeket a csatornákat el lehet úgy osztani, hogy a hozzáférési pontok ne interferáljanak egymással. Dolgozatomban ezt a szabványt használtam, mivel a később bemutatott SINR – SE hozzárendelést csak ennél a szabványnál definiálták. [12] [13] [14]

1.3 Heterogén mobil hálózatok

A növekvő sáv szélesség igény kielégítésére három megoldás lehetséges. Az egyik, a meglévő technológiák fejlesztése, amelynek célja a minél jobb spektrális hatékonyság elérése. A második módszer a bázisállomások egyre sűrűbben való elhelyezése. A harmadik módszer pedig a különböző vezeték nélküli hálózatok együttes használata. Dolgozatomban a meglévő LTE makro cellákat egészítettem ki LTE kiscellákkal, illetve Wi-Fi AP-okkal. Mindkét „kiegészítő” technológia alkalmas lehet az LTE makro rendszerrel együttesen működve plusz sáv szélesség erőforrásokat biztosítani a hálózatnak. [15]

2 Rádiós sáv szélesség igény meghatározása

A méretezés egyik alapfeladata a felhasználói adatsebesség-igények kiszolgálásához szükséges rádiós sáv szélesség kiszámítása. A szükséges sáv szélességet a spektrális hatékonyság ismeretében lehet meghatározni, ami az adott pontban érvényes „jelminőségtől”, azaz az SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio/ jel-interferencia-plusz-zaj) viszonytól függ.

Ha ismerjük egy felhasználó SINR értékét, akkor kiszámolható, hogy a felhasználónak mekkora sávszélességre van szüksége adott adatsebesség eléréséhez. Az SINR érték és az adatsebesség közötti kapcsolat technológiafüggő.

Az SINR fogalom bevezetésével lehet az interferenciát megjeleníteni a számításaimban.

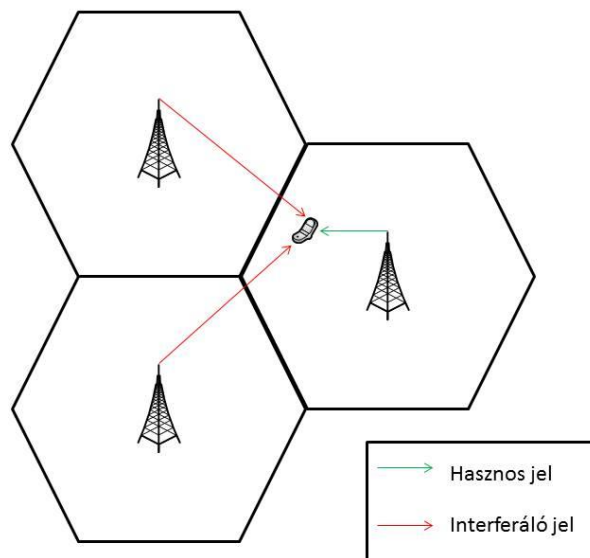
$$SINR = \frac{S}{N + I}$$

Ahhoz, hogy ki lehessen számolni egy cellában elhelyezkedő bármely pont SINR értékét, a kijelölt pontban meg kell határozni a jel teljesítményét (S), az interferencia értékét (I), valamint a zaj nagyságát (N). [16]

2.1 Gömbsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása

Ebben az alfejezetben ismertetem az SINR értékének meghatározását abban az esetben, ha az antennát gömbsugárzónak feltételezem.

A következő ábra szemlélteti egy készülékre ható különböző bázisállomások jeleinek hatását egy mobil készülékre.



2. ábra Hasznos jel és interferencia ábrázolása

A jel teljesítménye:

$$P_{jel_{dB}} = P_{adó_{dB}} + G_{dB} - PL(x, y, d)_{dB}$$

Ahol $P_{ad\acute{o}dB}$ az adótorony kisugárzott teljesítménye dB-ben, G_{dB} az antenna nyeresége dB-ben, $PL(x, y, d)_{dB}$ pedig a jel csillapítása (x, y) koordináta pontokon, ahol az origó a bázisállomás, amelynek sugara d .

Gömb sugárzó antenna esetén a csillapítás a technológiai paraméterek mellett csak a felhasználó és az antenna közötti távolságtól függ.

Ugyanez az összefüggés Wattra kifejtve:

$$P_{jel_W} = \frac{P_{ad\acute{o}_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W}$$

Az interferencia számításánál végig kell gondolni, hogy hány szomszédos bázisállomás zavaró jelét kell figyelembe venni. Ezen kívül meg kell határozni, hogy hány csatornát tudunk kiosztani, mert ez is befolyásolja, hogy hol helyezkedik el a legközelebbi adótorony, ami ugyanazt a frekvenciát használja, mint a vizsgált bázisállomás.

Dolgozatomban főleg LTE hálózatokra koncentráltam, azonban a gondolatmenetet kismértékű változtatásokkal bármely mobil technológiára lehet használni. A frekvenciasáv változtatása mellett fontos változtatás méretezés szempontjából a frekvencia újrahelosztás. 2G és 3G esetén lehetőség van a szomszédos bázisállomásoknak más frekvenciasávot kiosztani, így a vizsgált bázisállomás szomszédjai nem fognak interferenciát okozni. Ebben az esetben azonban csak az interferenciát okozó bázisállomások koordinátáit kell megváltoztatni, ami a program szempontjából egy kismértékű változtatás.

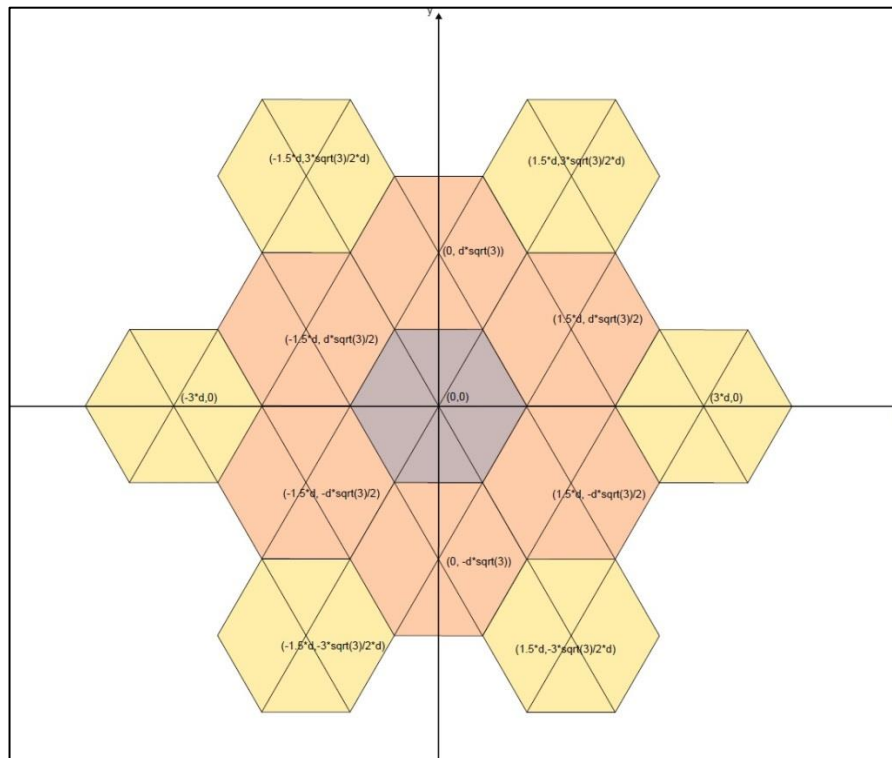
A csatorna sávszélességét 20 MHz-nek feltételeztem (a szabványban leírt maximális értéknek megfelelően), ami miatt egy csatornát használ az összes bázisállomás, így már a közvetlen szomszédos cellák bázisállomása is zavaró jelet fogja a hasznos jelet. Miután kiszámítottam az SINR értékét, azt figyeltem meg, hogy már a második szintű bázisállomások is minimálisan szólnak bele az interferenciába, úgyhogy számításaimban csak az első szintű bázisállomások jelennek meg, mint zavaró tényezők. A második szintű bázisállomások azok a bázisállomások, amelyek nem a vizsgált cella közvetlen szomszédjai, hanem a szomszéd szomszédja.

A 3. ábra láthatóak a környező cellaközéppontok trigonometrikus azonosságokkal meghatározott koordinátái, amelyekből azok távolsága, és a jelterjedési modell segítségével a zavaró jelek teljesítménye számítható.

Ezek alapján az interferencia értéke:

$$P_{interferencia_W} = \sum \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W}$$

Amely összefüggésnél az összes bázisállomásnak az interferenciáját figyelembe kell venni.



3. ábra LTE cellák elhelyezkedése

Az elektromos berendezések zajt keltenek, ami szükséges, hogy a számításaimban megjelenjen. A termikus zaj nagysága függ a hőmérséklettől és a sávszélességtől. A hőmérsékletet szobahőmérsékletnek (24°C) vettem, a sávszélesség pedig 20MHz-nek.

Így a termikus zaj kiszámítása [17]:

$$u = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B ,$$

ahol k – Boltzmann-állandó ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

T – hőmérséklet Kelvinben ($273 + ^\circ\text{C}$)

R – ellenállás ohmban (50Ω)

B – sávszélesség Hz-ben

Miután az SINR értékek minden komponense meg lett határozva, az SINR összefüggése:

$$SINR(x, y, d) = \frac{\frac{P_{adóW} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W}}{\sum \frac{P_{adóW} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W} + u}$$

2.2 Szektorsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása

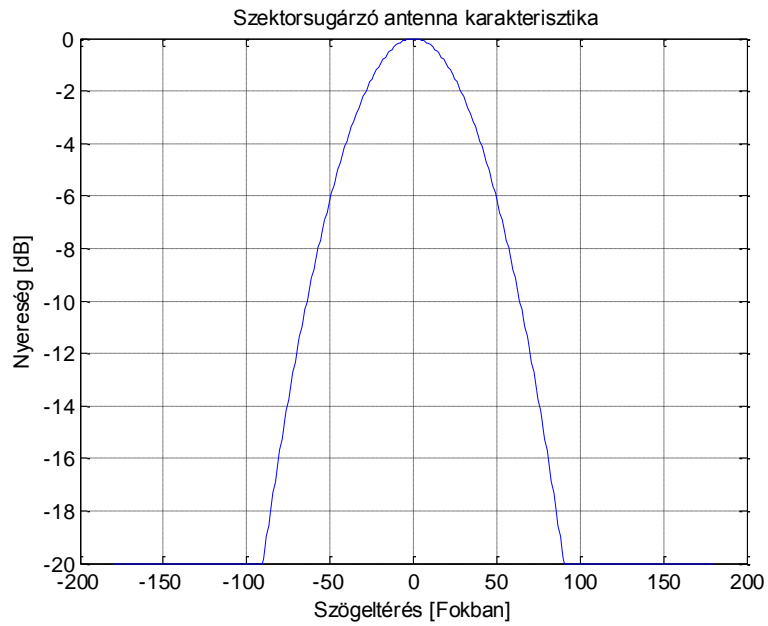
A gyakorlatban nem gömsugárzó, hanem szektorsugárzó antennákat használnak. A leggyakoribb elrendezés 3 darab szektorsugárzó használata, amelyek egymással 120 fokos szöget zárnak be.

A szektorsugárzók karakterisztikáját a '3GPP antenna pattern' [18] definiálja. Az antennák iránykarakterisztikája:

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \text{ ahol } -180 \leq \theta \leq 180$$

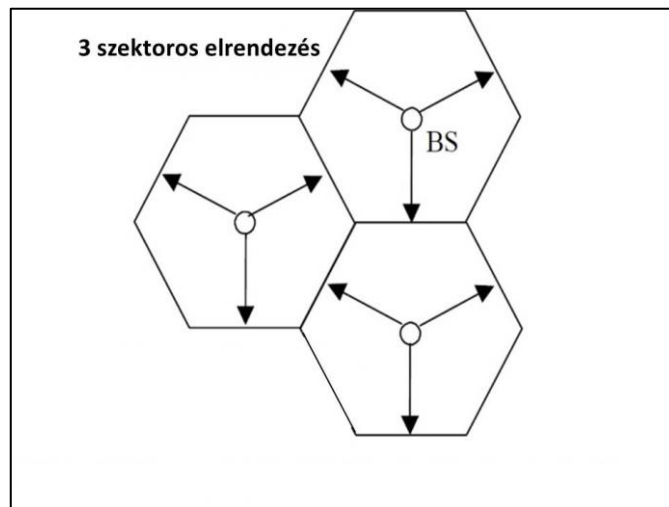
θ a szöget jelenti a vizsgált pont és az antenna főiránya között, θ_{3dB} a 3 dB-es sugárszélesség fokban, A_m pedig a maximális csillapítás. Ezek az értékek 3 szektoros elrendezésben: $\theta_{3dB} = 70$ fok, $A_m = 20\text{dB}$.

A következő ábrán lehet látni a karakterisztika grafikus megjelenítését.



4. ábra 3 szektoros sugárzó karakterisztikája [18]

A szektorsugárzók elhelyezkedésére is ad javaslatot a 3GPP, amelyet a következő ábrán láthatunk:



5. ábra 3-szektorsugárzó antennák elhelyezkedése [18]

A szektorsugárzó antenna karakterisztikájának az ismeretében az SINR fogalmának a pontosítása is lehetséges. A szektorsugárzó antennák bevezetése a bázisállomások teljesítményét fogja megváltoztatni. Egy szektorsugárzó antenna teljesítményét a következő összefüggés adja meg:

$$P_{jel_szektor\ dB} = P_{ad\ dB} + G_{dB} - PL(x, y, d)_{dB} - A(\theta).$$

Minden egyes bázisállomáshoz három teljesítményértéket rendelünk, amely a három szektorsugárzó teljesítménye külön-külön.

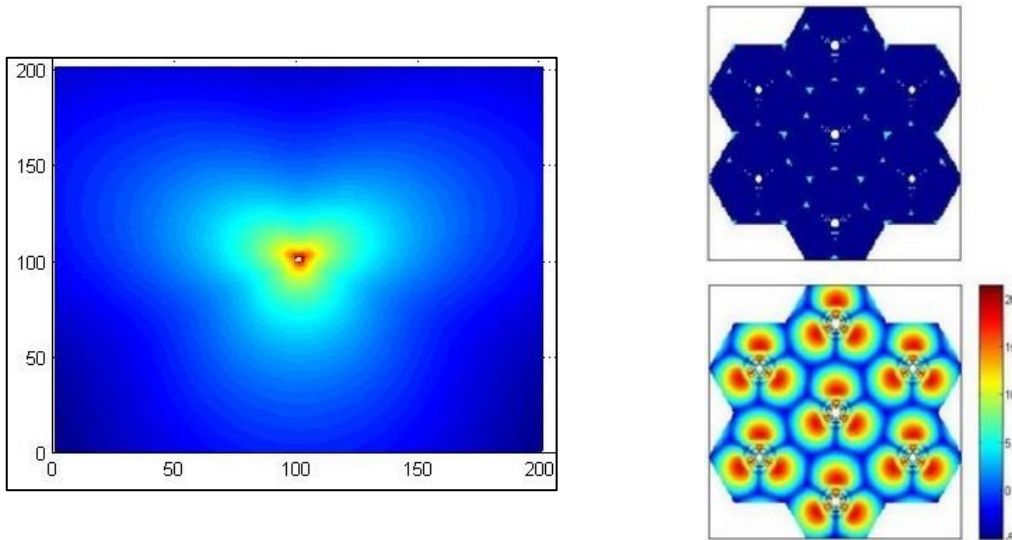
Ezeket a teljesítményeket Watt-ra átváltva, majd összeadva kapható meg, hogy egy bázisállomás mekkora teljesítményt tud szolgáltatni egy felhasználónak.

$$P_{jel_antenna_W} = P_{jel_szektor_1_W} + P_{jel_szektor_2_W} + P_{jel_szektor_3_W}$$

Ezek után már felírható az SINR kiegészített összefüggése szektorsugárzó antennákat használva:

$$SINR(x, y, d) = \frac{\frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W \cdot A(\theta)}}{\sum \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W \cdot A(\theta_i)} + u}$$

A következő ábrákon látható a három szektorsugárzó SINR leképezése:



6. ábra Szektorsugárzó SINR képe [mera.com]

A szektorsugárzóknál figyelembe kell még venni, hogy a rendelkezésre álló sáv szélességet (jelen esetben 20 MHz) háromszor tudja kiosztani, mivel mindegyik szektor rendelkezik 20 MHz-el. Ezért egy LTE makro bázisállomás összes kiosztható sáv szélessége 60 MHz lesz.

2.3 SINR meghatározása beltéri felhasználók esetén

Beltéri felhasználók kültéri makro bázisállomáshoz, illetve kültéri piko bázisállomáshoz való csatlakozásakor figyelembe kell venni az épületek csillapítását (wall penetration) az SINR kiszámításakor. Ebben az esetben minden rádiós jel, amelynek az útját keresztezi egy épület, csillapodni fog. Az alábbi formulán látszik az SINR kiszámításának módosítása:

$$SINR_{indoor} = \frac{\frac{S}{WP}}{\frac{I_1}{WP} + \frac{I_2}{WP} + \dots + \frac{I_n}{WP} + N}$$

Ahol WP jelenti a fal csillapítását arányszámban (pl.: $WP_{dB} = 20dB \rightarrow WP = 100$).
[19]

2.4 Jelterjedési modell

Munkám során a legelterjedtebb, legszélesebb körben használt Okumura-Hata (és annak későbbi, magasabb frekvenciákra történő kiterjesztése, az ún. COST231 modell) [20] [21] [22] rádiófrekvenciás jelterjedési modellt alkalmaztam, amely alkalmas a bázisállomások lefedettségi területének kiszámítására. A modell összefüggéseket ad a mobil hálózatok különböző paramétereinek egymással való kapcsolatára. A frekvencia (f), a bázisállomások magassága (h_{base}), a mobil állomás magassága (h_{mobile}), az antennák közötti távolság (d) és a környezet (nagyvárosi, városi, vidéki) ismeretében meg tudja határozni a jel csillapítását (L) a bázisállomás és a mobil állomás között.

150-1000 MHz között:

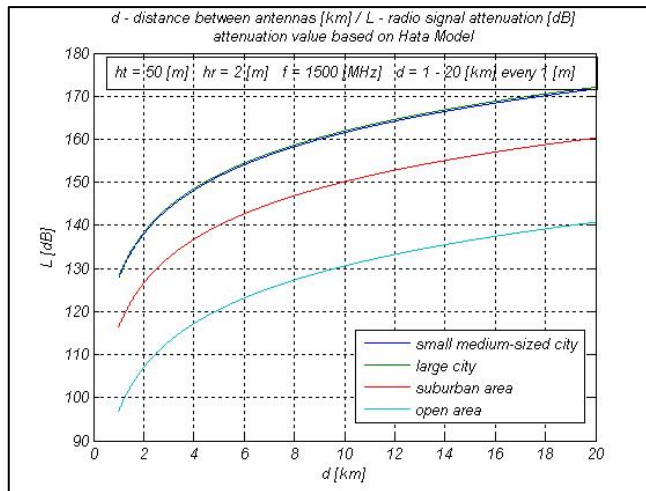
$$L = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{base}) - a + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{base})] \log_{10}(d) + C,$$

ahol a és C két változó, amelyeknek az értéke a frekvenciától, a mobil állomás magasságától és a környezettől függ.

1500-2000Mhz között:

$$L = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{base}) - a + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{base})] \log_{10}(d) + C.$$

A következő ábrán látható a fenti összefüggés adott paraméterek mellett:



7. ábra COST231-Okumura-Hata modell

2.5 A spektrális hatékonyság kiszámítása

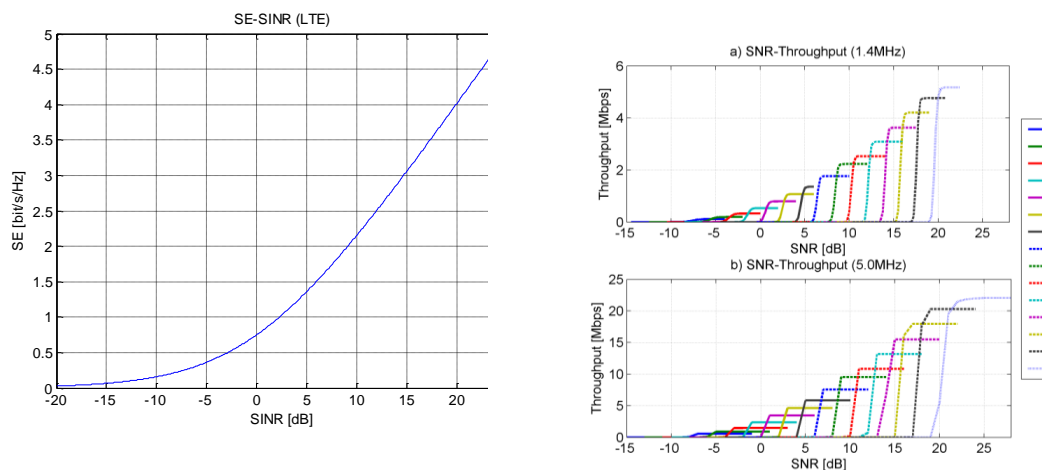
Az LTE egyik nagy előnye az adaptív kódolás. Ennek a lényege, hogy jó csatorna mellett nagy állapotszámú modulációt használ, így gyenge a hibavédelem, ami által a hasznos átviteli sebesség nagy lesz. Rossz csatorna esetén alacsony állapotszámú modulációt használ, amely növeli a hibavédelmet, de csökkenti a hasznos átviteli sebességet.

Az Alpha-Shannon Formula kapcsolatot teremt a spektrális hatékonyság ($bit/s/Hz$) és az SINR között LTE hálózatoknál. [23]

$$SE_h = \alpha \cdot \log_2(1 + 10^{\frac{SINR_h}{10 \cdot IF}})$$

Ahol SE_h a spektrális hatékonyság, $\alpha = 0,75$ és $IF = 1,25$ konstansok.

A 8. ábra bal oldali képén látható a formula kirajzolása. A jobb oldali ábrán megfigyelhető, hogy az adaptív kódolás és moduláció miatt eltérő SINR értékekhez más és más spektrális hatékonyság tartozik, ennek a görbeseregnek a közelítő burkolója az Alpha-Shannon Formula.



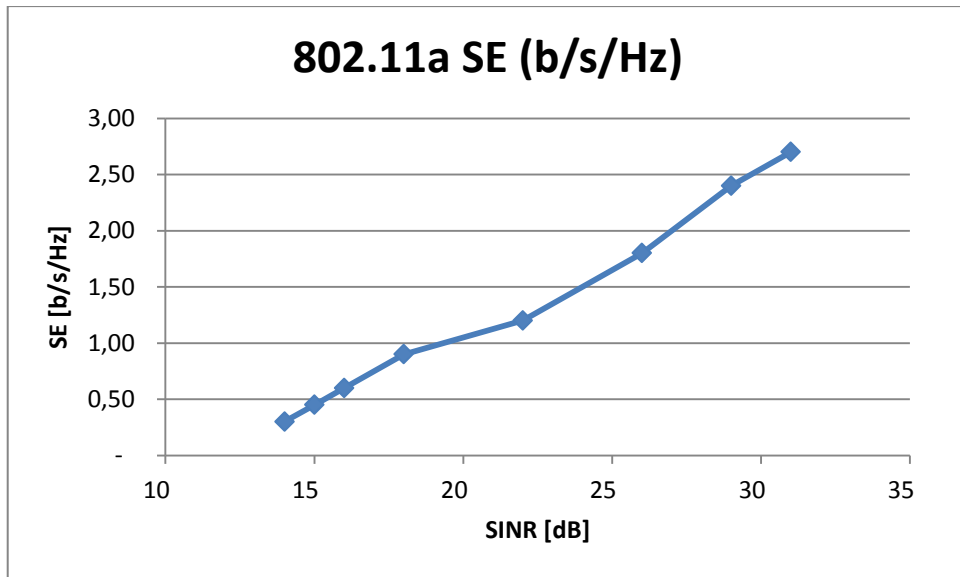
8. ábra Alpha-Shannon Formula [24]

MIMO használatával növelhető a spektrális hatékonyság, azonban ez nem mehet egy bizonyos érték fölé. A legmagasabb rendű szabványosított moduláció, amit figyelembe vettem, a 256-QAM - az ehhez tartozó maximális spektrális hatékonyság értéke pedig 7 körül van. Ezért a méretezés során én is maximalizáltam a függvényemet erre az értékre.

IEEE 802.11a Wi-Fi szabványnál a spektrális hatékonyság és az SINR érték közötti kapcsolatot a Cisco definiálta. Méretezésnél interpoláció segítségével lehet megállapítani, hogy adott SINR értékhez mekkora spektrális hatékonyság tartozik. Az alábbi táblázat definiálja az értékeket [25]:

802.11a SE (b/s/Hz)	SINR (dB)
2.7	31
2.4	29
1.8	26
1.2	22
0.9	18
0.6	16
0.45	15
0.3	14

A következő ábrán a táblázatnak megfelelő értékek grafikus megjelenítése látható:

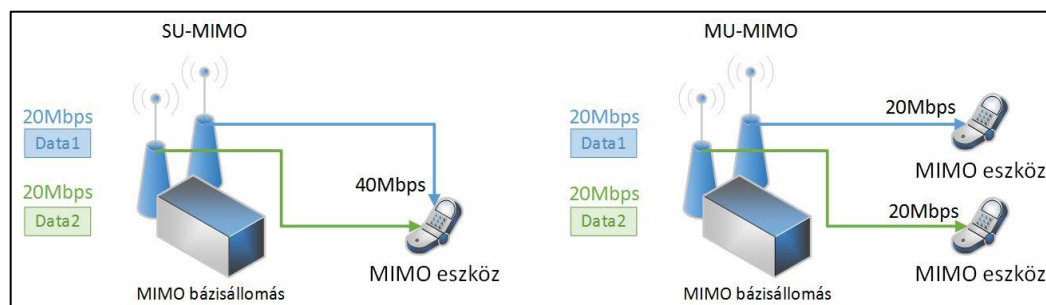


9. ábra 802.11a spektrális hatékonyság

2.6 MIMO (multiple-input and multiple-output)

A MIMO, vagyis több vevő és adóantenna használata lehetőséget biztosít több független csatorna használatára egyazon térben és időben. Ezáltal a felhasználóknak szánt adatsebességet több antennán keresztül fogjuk biztosítani, amellyel sáv szélességet lehet megtakarítani.

A MIMO-nak két típusa van a felhasználók számát tekintve: SU-MIMO (Single User) és MU-MIMO (Multi User). A következő ábra szemlélteti a két típus között a különbséget [32] [33]:



10. ábra MIMO

A méretezésnél 4x4-es MIMO-val számoltam, azonban a 3GPP már definiálta a 8x8-as MIMO-t is [34]. A MIMO a méretezésben két helyen jelenik meg:

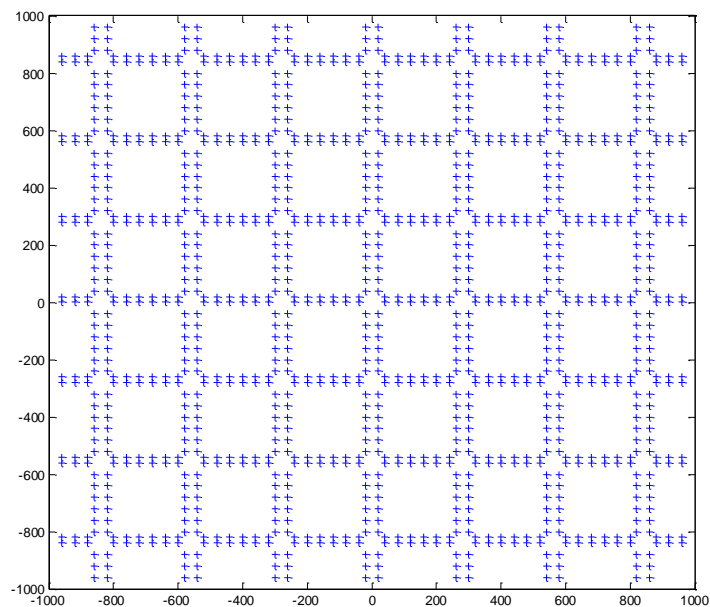
1. A szüksége adatsebességet a felhasználó több antennán keresztül kapja meg, így az antennánként biztosítandó adatsebességet le lehet osztani az antennák számával.
2. Ha MIMO-s rendszert alkalmazunk a bázisállomásoknál, akkor kompenzálnunk kell a teljesítményt, hiszen a gyakorlatban a MIMO-s antennák külön-külön nem sugározhatnak ugyanakkora teljesítménnyel, mint ha csak egy antenna lenne - helyette a MIMO antenna-tömb összteljesítményét korlátozzuk. Az egyik ilyen kompenzációs lehetőség, amit a méretezés során én is használtam, hogy a maximális antenna teljesítményt elosztottam a MIMO antennák számával (pl.: 60W-os adóteljesítmény és egy 4x4-es MIMO esetén az antennák teljesítménye: $60W/4 = 15W$ lesz).

Számításaim során feltételeztem, hogy valóban létezik 4 vagy 8 független jelút a bázisállomások és a készülék között, így a 4x4 vagy 8x8 MIMO kapacitás-növekménye teljes mértékben kihasználható.

3 Heterogén hálózat méretezése

3.1 A vizsgált terület térbeli eloszlása

Modellemben az utcák és az épületek definiálására egy szabályos rácsot használtam (regular grid structure). A terület definiálásához szükséges paraméterek: N az egy oldalon található háztömbök száma, L az utcák közötti távolság, k az utcák közötti házak száma, és d az utca és a ház központ közötti távolság. Ekkor a vizsgált terület oldalhossza: $(N - 1) \times L$. Az alábbi ábrán látható a méretezésnél később használt terület, az épületek és utcák definiálásával [26]:



11. ábra A vizsgált terület

3.2 Forgalmi terhelés szimulációja

3.2.1 A modell alapkonceptiója

A méretezéshez Monte Carlo szimulációt alkalmaztam [27] [28]. A Monte Carlo szimuláció egy széles körben elterjedt számítási eljárás, amelynek alapját egy algoritmus többszörös lefuttatása képezi. Az algoritmus lefutásához véletlen generált adatokat használ, amely eredményeként statisztikai következtetéseket lehet levonni.

A Monte Carlo szimuláció során felhasználókat adott valószínűségi eloszlás szerint helyezek el a kijelölt területre és azt vizsgálom, hogy ezen felhasználók kiszolgálására elegendőek-e a területen adott koordinátákon elhelyezett makro, illetve kültéri piko bázisállomások.

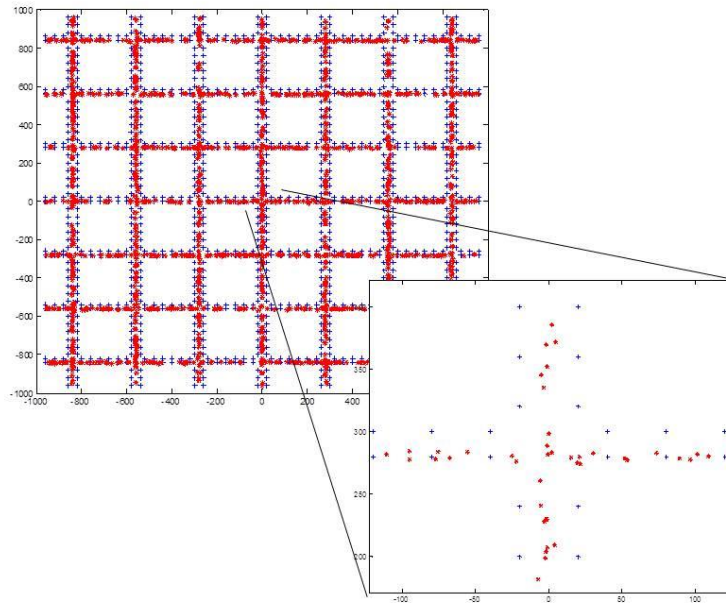
3.2.2 Kültéri felhasználók térbeli eloszlása

A kültéri felhasználók az utcákon helyezkednek el. A felhasználók térbeli eloszlására két féle eloszlásfüggvényt használtam. Először egyenletes eloszlás szerint kiválasztom, hogy a felhasználó melyik utcában tartózkodik. Ha egy vízszintes utcát választottam, akkor az x koordinátáját szintén egyenletes eloszlás szerint számolom, az y koordinátáját viszont normális eloszlás szerint, ahol a várható érték az utca közepe. Ha függőleges utcát sorsolok, akkor a két koordináta kiszámítási módja megcserélődik.

```
street_number = randi(2*N-2,1);
if street_number < N
    x_user = rand(1)*(((N/2)-1)*L + (k/2)*delta)*2-
        (((N/2)-1)*L + (k/2)*delta);
    y_user = y_street(street_number) + normrnd(0,3);
else
    x_user = x_street(street_number-(N-
        1))+normrnd(0,3);
    y_user = rand(1)*(((N/2)-1)*L + (k/2)*delta)*2-
        (((N/2)-1)*L + (k/2)*delta);
end
```

Ahol δ jelenti a két ház közötti távolságot.

A következő ábrán láthatóak a kültéri felhasználók eloszlásának illusztrációja:



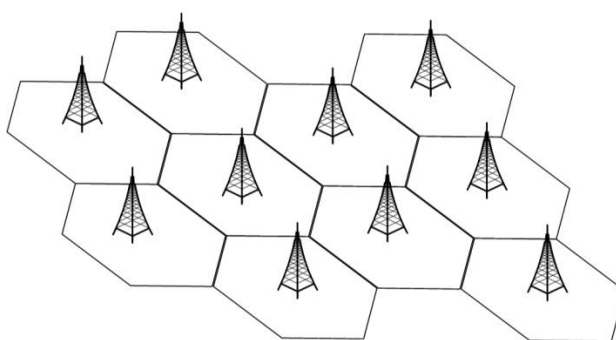
12. ábra Kültéri felhasználók térbeli eloszlása

3.2.3 Beltéri felhasználók térbeli eloszlása

A beltéri felhasználók definiálásakor nem a felhasználó pozícióját (x,y koordinátát), hanem az épületben található felhasználók számát kell meghatározni. A épületek meghatározása után sorsolással döntöttem el, hogy melyik épületben hány emelet található. Ezt a sorsolást eltároltam, és a méretezés közben végig ezekkel a számokkal dolgoztam. Definiáltam, hogy egy emeleten hány lakás, illetve, hogy egy lakásban átlagosan hány felhasználó található. Ezen paraméterek definiálása után ki lehet számolni, hogy egy épületben hány beltéri felhasználó tartózkodik. A beltéri felhasználók pozíciója megegyezik az épületek koordinátaival. A beltéri felhasználók számát az épületben található átlagos felhasználók számának módosításával változtattam.

3.3 A kültéri bázisállomások elhelyezése

A modell első lépése, hogy az LTE makro bázisállomásokat szabályos hatszög struktúrában helyezem el a területen, ahogy látható a 13. ábrán.



13. ábra Hexagonális cellák elhelyezése

A piko bázisállomásokat szintén egy hasonló szabályos struktúrában helyezem el. A makro cellák és az piko bázisállomások arányát a makro cellasugár és az piko bázisállomások közti távolság (avagy a cella- és AP-sűrűség) arányának változtatásával érem el. Ha a makro bázisállomások és az egy makro cellában lévő piko bázisállomások aránya 1:Q, akkor a piko bázisállomások sűrűségét úgy kell beállítani, hogy egy bázisállomás területére Q darab piko bázisállomások jusson.

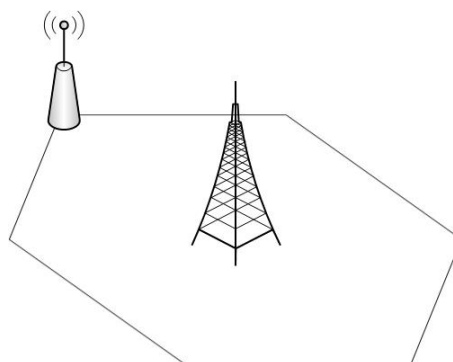
Egy hatszög területe: $A_{\text{hatszög}} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot d^2$, ahol d a hatszög sugara.

Így a területek között fennálló arányból kiszámolható, hogy mekkora legyen egy piko bázisállomás sugara:

$$\frac{A_{LTE}}{A_{AP}} = \frac{d_{LTE}^2}{d_{AP}^2} = \frac{Q}{1}$$

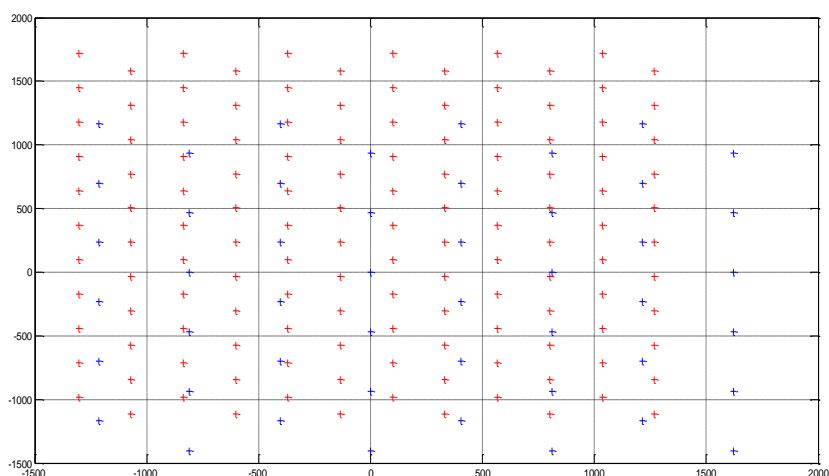
Ez alapján a piko bázisállomás sugara: $d_{AP} = d_{LTE} / \sqrt{Q}$, ahol Q azt a számot jelenti, hogy hány piko bázisállomás legyen egy bázisállomás területén.

Ha ugyanazt az elrendezést használnám, mint a bázisállomásoknál, akkor sok helyen a bázisállomás és a piko bázisállomás pozíciója egybe esni és az eredményeket meghamisítaná. Azért, hogy elkerüljem ezeket az ütközéseket, az piko bázisállomások hatszögrácsát eltolom úgy, hogy a referencia pont, amihez igazítom a rácsot, a (0,0) koordinátájú bázisállomás bal felső sarkába legyen. Ez látható a következő ábrán:



14. ábra Referencia piko bázisállomás elhelyezése

Így tehát előállt két hatszögrács, amelyet egymásra lehet helyezni. Ha például $Q = 3$, tehát egy cellában három piko bázisállomás található, akkor a következő ábra mutatja, hogy a bázisállomások, illetve az piko bázisállomások hogyan fognak elhelyezkedni az adott területen. A kék keresztet a bázisállomás, a piros keresztet pedig az piko bázisállomások pozícióját jelölik.



15. ábra $Q=3$ esetén a makro és piko bázisállomások elhelyezése

3.4 A beltéri piko bázisállomások és a Wi-Fi AP-ok elhelyezése

Modellem beltéri jelterjedéssel nem számol, ugyanakkor figyelembe veszi az épületben található beltéri kis cellás rendszereket. Előre definiálok egy arányszámot, amely azt mondja meg, hogy az épületben található beltéri felhasználók hány százaléka

csatlakozik beltéri kiscellás bázisállomáshoz. Ha például 30 beltéri felhasználó van egy épületben és ezeknek az 50%-át beltéri kiscella szolgálja ki, akkor 15 felhasználó beltéri bázisállomáshoz csatlakozik és 15 piko bázisállomás szükséges ezen felhasználók kiszolgálásához. Ha a beltéri felhasználók száma annyira kicsi, hogy előfordul, hogy valamelyik épületben mindössze egy felhasználó tartózkodik, akkor azt az egy beltéri felhasználót beltéri egységhez fog csatlakozni.

3.5 Hálózati modellek, felhasználók bázisállomáshoz rendelése

A szimuláció alapkoncepciójának az ismertetése, a terület és a felhasználók definiálása, illetve a bázisállomások és AP-ok/piko bázisállomások elhelyezési stratégiája után a következő lépés a felhasználók kültéri piko bázisállomásokhoz és makro bázisállomásokhoz való hozzárendelésének a definiálása.

3.5.1 LTE makro- és kiscellás heterogén hálózati modell

LTE makro- és kiscellás heterogén mobil hozzáférési hálózat esetén a kiscellákat a vizsgált területen sűrűbben helyezük el, mint az LTE makro bázisállomásokat, a hálózat kapacitásának a növelése érdekében. A modell első lépése, hogy a beltéri felhasználókat beltéri piko bázisállomásokhoz csatlakoztatom. Azok a felhasználók, akik nem tudtak beltéri egységhez kapcsolódni, kültéri makro vagy piko bázisállomáshoz fognak csatlakozni.

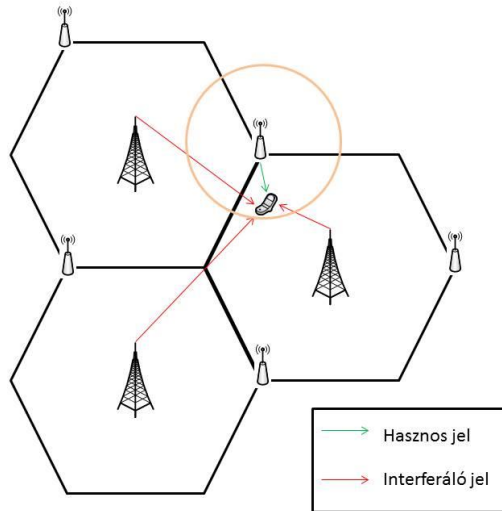
3.5.1.1 Beltéri (indoor) felhasználók SINR értékének meghatározása

Az LTE makro + piko heterogén hálózati modellben először azok a beltéri felhasználókat próbálnak a hálózatra kapcsolódni, akik nem tudtak beltéri piko bázisállomáshoz csatlakozni. Ezek a felhasználók a legjobb SINR értékhez tartozó makro vagy piko bázisállomáshoz fognak kapcsolódni – amennyiben az adott makro vagy piko bázisállomás szabad kapacitása ezt lehetővé teszi.

Első lépésként kiszámolom minden egyes felhasználóra az SINR értékét, az összes piko bázisállomáshoz viszonyítva. Ebben az esetben kétféle interferencia jelenik meg. Az egyik a makro bázisállomások által okozott interferencia, mivel a modellemben az LTE makro bázisállomások ugyanazt a frekvenciasávot használják,

mint a piko bázisállomások, a másik pedig a piko bázisállomások egymásra ható interferenciája.

A következő ábrán látható egy felhasználó kapcsolódása egy piko bázisállomáshoz:



16. ábra Piko bázisállomáshoz való kapcsolódás

A 16. ábra jól látható a piko cella által szolgáltatott hasznos jel, illetve a makro bázisállomások által okozott interferencia. Modellemben, a piko cellák akkor interferálnak egymással, ha a köztük lévő távolság kisebb, mint a piko bázisállomás hatósugara. A 16. ábra egy olyan eset látható, amikor nem esik bele a piko bázisállomás hatósugarába egy másik piko bázisállomás, így nem kell az interferenciájával számolni.

A piko bázisállomásokhoz viszonyított SINR érték kiszámításánál a piko bázisállomást gömbsugárzó antennának feltételezzük.

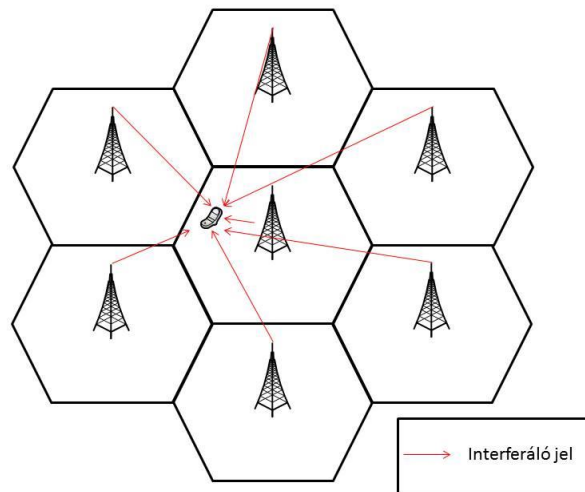
A hasznos jel kiszámításakor meg kell keresni, hogy melyik piko bázisállomás biztosítja a legnagyobb teljesítményt. Ehhez az alábbi összefüggést használtam. Ezt az értéket minden piko bázisállomásra kiszámítottam:

$$P_{jelW} = \frac{P_{adóW} \cdot G_W}{PL(d)_W \cdot WP}$$

A makro bázisállomások interferenciájának meghatározásának első lépése annak a vizsgálata, hogy a felhasználó melyik LTE makro cella területén tartózkodik. Ezt az implementációban úgy valósítottam meg, hogy megkerestem, hogy melyik makro

bázisállomás szolgáltatja a legnagyobb teljesítményt. Az interferencia számításánál ennek a bázisállomásnak, illetve a körülötte lévő bázisállomásoknak a jelét veszem figyelembe, mint interferencia.

Ez az elrendezés jól látható a következő ábrán:



17. ábra A makro bázisállomások interferenciája

A makro bázisállomások által okozott interferencia meghatározása után, a piko bázisállomások hasznos jelre vonatkozó káros interferenciájának a kiszámítása szükséges.

A piko bázisállomás interferenciája függ attól, hogy a felhasználó és a piko bázisállomás hol helyezkedik el. A felhasználó köré húzunk egy akkora kört, amekkora a piko bázisállomás hatósugara. Ebben a körben található piko bázisállomások interferáló jelként fognak megjelenni és ezen bázisállomások teljesítményeinek az összege adja meg a piko cellák által okozott interferenciának a nagyságát.

A két interferenciának az összege adja meg a teljes interferencia értékét.

Ezeknek az összefüggéseknek a segítségével, minden épület koordinátához kiszámítható annyi SINR érték, amennyi piko bázisállomás található a vizsgált területen, feltételezve, hogy a felhasználó piko bázisállomáshoz kapcsolódik.

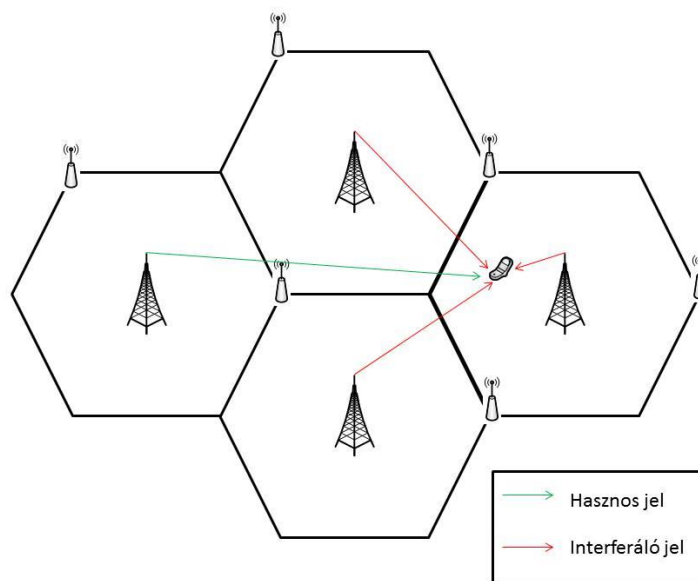
A következő lépés a felhasználók szükséges sáv szélességeinek a meghatározása. Modellemben a piko cellás rendszerek LTE szabványt követnek, így az SINR és a

spektrális hatékonyság kapcsolatát az Alpha-Shannon Formula (ld. 2.5) adja meg. A spektrális hatékonyságot elosztva a felhasználói adatsebesség igényével, a szükséges sávzélesség határozható meg:

$$B = C_{igény} / SE$$

A következő lépésként kiszámolom minden egyes felhasználóra az SINR értékét abban az esetben, ha makro bázisállomáshoz kapcsolódik.

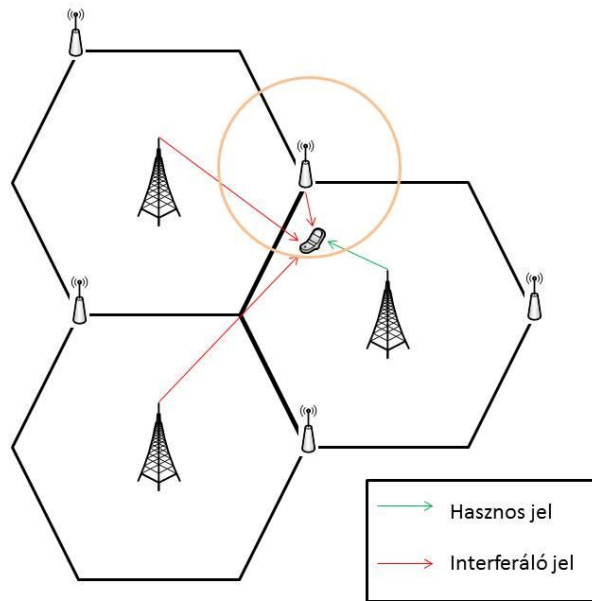
Az interferencia ebben az esetben is két részből áll össze. Az egyik a környező makro bázisállomások, a másik pedig a felhasználó környezetében található piko bázisállomás zavaró jele. Abban az esetben, ha a hasznos jelet szolgáltató makro bázisállomás távolabb helyezkedik el, akkor annak a makro bázisállomásnak a jele is interferenciaként jelenik meg, amelyik a legjobb jelszintet bocsátja ki. Ez látható a következő ábrán:



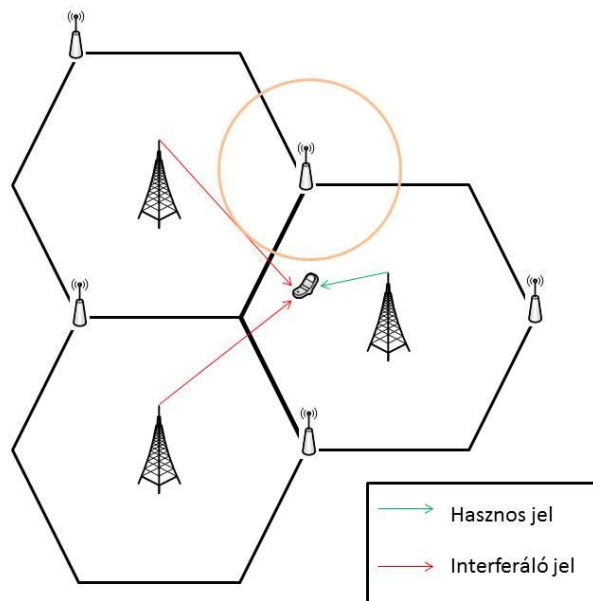
18. ábra Távoli makro bázisállomáshoz való kapcsolódás

Csak abban az esetben van interferáló hatása a piko bázisállomásnak, ha a felhasználó a piko bázisállomás hatósugarában helyezkedik el.

A következő két ábra illusztrálja az LTE bázisállomáshoz való kapcsolódását, amikor egy piko bázisállomás jele is zavaró interferenciaként jelenik meg, illetve amikor a felhasználó nem esik a piko cella hatósugarába.



19. ábra Piko bázisállomás interferenciája LTE bázisállomáshoz való kapcsolódáskor



20. ábra A felhasználó a piko bázisállomás hatósugarán kívül helyezkedik el

Ezek alapján minden épület koordinátájához viszonyítva kiszámítható az SINR érték abban az esetben, ha a felhasználó makro bázisállomáshoz kapcsolódik. A szüksége sáv szélesség igény az SINR-ből ugyanúgy számolható, mint kis cellás rendszereknél, hiszen ugyanaz a technológia.

3.5.1.2 Kültéri (outdoor) felhasználók SINR értékének meghatározása

A kültéri felhasználók SINR értékének kiszámítása hasonló módon történik, mint a beltéri felhasználóknál, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben nem kell a fal csillapításával számolni, illetve, hogy egy koordináta helyen most csak egy felhasználó található.

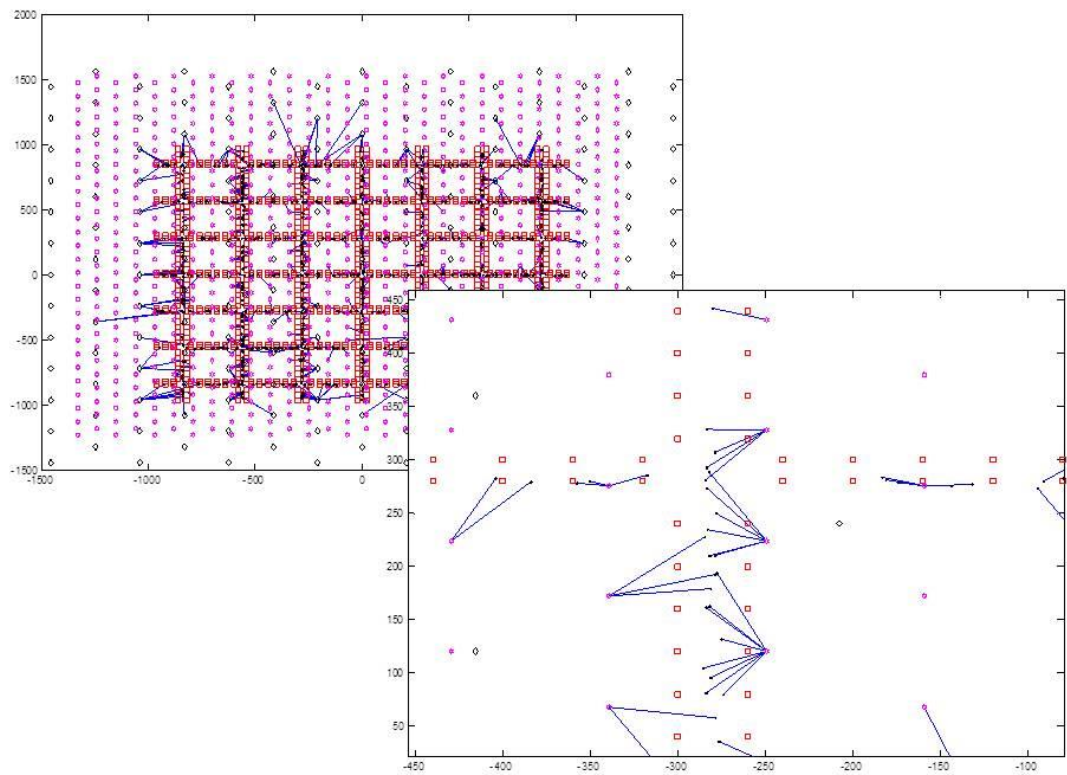
3.6 Beltéri és kültéri felhasználók bázisállomásokhoz való rendelése

Miután kiszámoltam a beltéri és kültéri felhasználók SINR értékét piko illetve makro bázisállomáshoz való csatlakozásának esetén, a következő lépés a felhasználók bázisállomásokhoz való rendelése.

Elsőként az épületekben található felhasználókat rendelem bázisállomásokhoz. Mivel célom az erőforrás optimalizálás, ezért a legjobb SINR értékű felhasználót próbálom először bázisállomáshoz rendelni. Az SINR értékek maximalizálása megegyezik a sáv szélesség igények minimalizálásával. Ha egy bázisállomás illetve szektor rendelkezésére álló 20 MHz-es sáv szélessége betelik, akkor ahhoz a bázisállomáshoz már nem lehet csatlakozni. Az algoritmus mindig a legkisebb sáv szélességű igényű felhasználókat próbálja bekötni, így amikor elérkezik az algoritmus ahhoz a ponthoz, hogy a legkisebb sáv szélesség igény meghaladja a 20 MHz-et, akkor azokat a felhasználókat, akiket addig nem csatlakoztatta bázisállomáshoz, már nem is fogja tudni. Ezeknek a felhasználóknak a számát a szimuláció során egy számlálóban tárolom.

Az utcákon elhelyezkedő kültéri felhasználók is hasonló algoritmus szerint próbálnak bázisállomáshoz kapcsolódni. Először a legkisebb sáv szélesség igényű felhasználó próbál kültéri bázisállomáshoz csatlakozni, majd a következő. Ebben az esetben is egy számláló számolja azon felhasználók számát, akik nem tudtak kapcsolódni egy bázisállomáshoz sem, mert vagy nem volt elegendő rádiós erőforrás, vagy túl rossz SINR értékkel rendelkeztek.

A következő ábrán illusztrálom az utcán lévő kültéri felhasználók bázisállomásokhoz való csatlakozását:



21. ábra A kültéri felhasználók kcscsolódása kültéri bázisállomásokhoz

Megfigyelhető a kinagyított ábrán, hogy a felhasználók egy közeli bázisállomáshoz csatlakoznak. Az is megfigyelhető, hogy akadnak olyan felhasználók a vizsgált terület szélén, akik egy jóval távolabbi bázisállomáshoz kapcsolódnak. Ennek oka, hogy a beltéri felhasználók „elhasználták” a kültéri felhasználó közelében lévő bázisállomások sáv szélességét és ezért egy távoli bázisállomáshoz kell kapcsolódnak. Persze ez csak akkor lehetséges, ha a sáv szélesség igénye nem haladja meg a 20 MHz-et.

3.6.1 A hiba meghatározása

A következő feladatomban annak a vizsgálata, hogy mekkora hiba történik adott bemeneti paraméterek mellett (makro bázisállomás sugár, piko bázisállomás sugár, kapacitás feltételek, stb.).

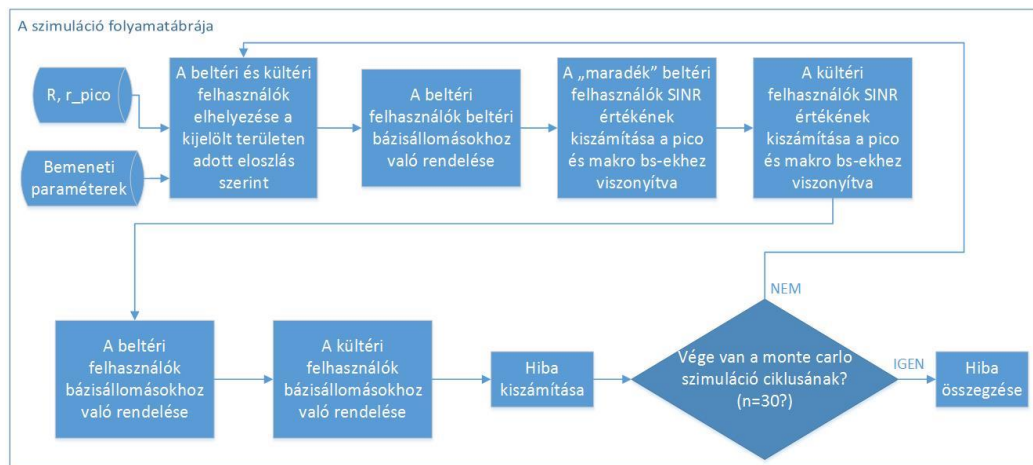
A hiba meghatározásának első lépése, hogy összeszámolom azoknak a felhasználóknak a számát, akik nem tudtak kapcsolódni a bázisállomásokhoz. Ezen felhasználók számának és az összes felhasználó számának a hányadosa fogja megadni a méretezés hibáját. A Monte Carlo szimuláció során az adott heterogén hálózati konfiguráció nem léphetett túl egy adott hiba-küszöböt (az alkalmazott hibahatár a számítási eredményeket bemutató fejezet tartalmazza).

4 Implementáció

A mobil heterogén hálózatméretező modult a MATLAB[®] programcsomaggal készítettem el. Hogy miért a MATLAB[®] keretrendszerét választottam, azt több előnyös tulajdonsága is indokolta:

- Számításaimban elsősorban numerikus és mátrixalgebrai feladatokat kellett elvégezniem, amelyeket hatékonyan tud elvégezni a program.
- A szkriptnyelv sajátosságai miatt az implementáció kényelmessé vált.
- Az adatok kiterjedt megjelenítési és ábrázolási lehetőségei állnak rendelkezésre.

A szimuláció folyamatábrája látható a következő ábrán:



22. ábra A szimuláció folyamatábrája

Jól látható, hogy a folyamatábrán, a különböző bemeneti paraméterek mellett (területre jellemző paraméterek, kapacitássűrűség, technológia) megjelenik a makro és piko bázisállomások sugara. A méretező modul ezen paraméterek és a modell felhasználásával számítja ki, hogy hány felhasználónak nem tudja a hálózat biztosítani az előírt adatsebesség igényt. Ha ezt a hiba arányt csökkenteni szeretnénk, akkor azt a bázisállomások számának a növelésével lehet elérni. A program futásának gyorsítására egy olyan automatizmust építettem bele, hogy elegendő a makro bázisállomás sugarát illetve a hibaküszöböt megadni és a modul addig csökkenti a kültéri piko bázisállomás sugarát, amíg el nem éri a hibahatárt. Ez segített abban, hogy a méretezés ne követeljen állandó fizikai jelenlétet.

5 Eredmények

A szimuláció egyik leglényegesebb pontja a megfelelő bemeneti paraméterek megválasztása. Az előző fejezetekben ismertettem egy kiegészítő technológiát használó heterogén mobil hozzáférési hálózati modellt. Ebben a fejezetben szeretném bemutatni a bemeneti paramétereket, a méretés eredményeit különböző bemeneti paraméterek mellett, illetve, különböző következtetéseket levonni.

5.1 Bemeneti paraméterek definiálása

A bemeneti paramétereknek az NGMN (Next Generation Mobile Network) 5G White Paper-ben [29] és COMBO Európai FP7-es [30] projektben, sűrűn lakott városi területekre (dense urban) definiált értékeket használtam. Az ebben a fejezetben bemutatott paraméterek középtávon (2020) bekövetkező forgalmi igényeket és az akkor előre láthatóan rendelkezésre álló erőforrásokat mutatja be.

A kiindulásnál használt bemeneti paraméterek:

Terület típus:	nagyváros/dense urban
LTE frekvencia:	1800 MHz
LTE makro bázisállomás magassága:	50 m
LTE piko bázisállomás magassága:	5 m
Mobil készülék magassága:	2 m
LTE bázisállomás sávszélessége:	20 MHz
LTE makro bázisállomás maximális teljesítménye szektoronként:	60 W
LTE piko adó maximális teljesítménye:	30 W
Antenna nyereség:	12 dB
MIMO rendszer:	4x4
Vizsgált terület mérete:	kb. 2x2 km
Az épületek emeletszáma:	3-7

Szintenként átlagos lakásszám:	4
Lakások lefedettségének aránya beltéri kiscellákkal:	50%
Felhasználók száma:	kb. 1825/km ²
Felhasználók (tartósan fennálló) adatsebesség igénye	1 Mbps/felhasználó

A MIMO konfigurációt illetően a ma elterjedt, „state of the art” megoldás a 2x2, míg a jelenleg az LTE-Advanced szabványban leírt legmagasabb rendű konfiguráció 8x8. Az általunk vizsgált időtávon, szélesebb körben a következő lépcsőn jelentő 4x4 MIMO-ra számíthatunk, így a számítások során ezt vettem figyelembe.

Az alkalmazott forgalmi mintát kétféleképpen lehet megváltoztatni. Az egyik a felhasználók számának, a másik pedig a felhasználók adatsebesség igényének a megváltoztatása, amelyek a forgalomsűrűség megváltoztatásához vezetnek:

$$C_{terület} = \rho_{indoor} \cdot C_{indoor} + \rho_{outdoor} \cdot C_{outdoor} \left[\frac{Mbps}{km^2} \right]$$

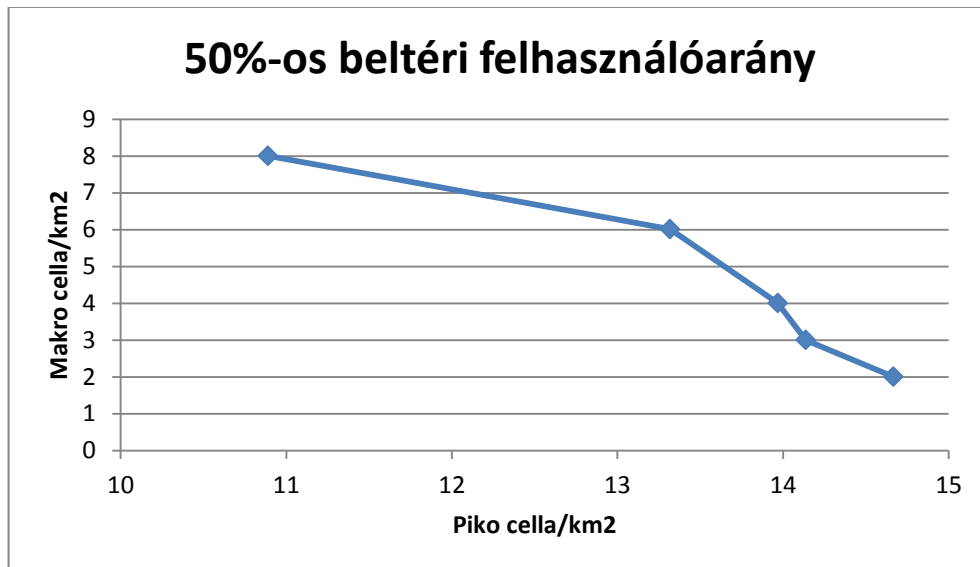
A 6. fejezetben egy kitekintés található, amely az 5G mobil hálózatok elterjedésekor várható értékeket mutatja be. A kitekintés tartalmazza mind a kapacitás igényeket, mind a remélhetőleg rendelkezésre álló erőforrásokat.

5.2 Méretezés eredménye, beltéri felhasználók számának hatása

Az elkészült Matlab modul segítségével LTE makro + piko cellás heterogén mobil hozzáférési hálózat esetén végeztem méretezéseket különböző forgalmi minta alapján. Jelen fejezet elején a méretező modul működését illusztrálom néhány heterogén hálózati méretezés eredményével, majd az egyes hálózati konfigurációk méretezési eredményeim főleg a költségek figyelembe vételével vizsgálom a következő fejezetben.

Ezen alfejezetben elsődlegesen a főbb paraméterek változásának hatását vizsgálom, különösen tekintettel a nem triviális összefüggésekre. Először azt vizsgáltam, hogy hogyan változnak a méretezési eredmények, ha változtatom a hálózathoz beltérről kapcsolódó felhasználók arányát. Az első az aktív felhasználók 50%-a beltéri felhasználó. A fejezet elején leírtaknak megfelelő 50% beltéri femtocellás

lefedettséget feltételezve így az összes felhasználó 25%-a beltéri femtocellához csatlakozik, újabb 25% kültéri piko vagy makrocellához (elszenvedve az épületfalak csillapító hatását), a fennmaradó 50% kültéri felhasználót pedig értelemszerűen szintén a kültéri mobilhálózat szolgálja ki.

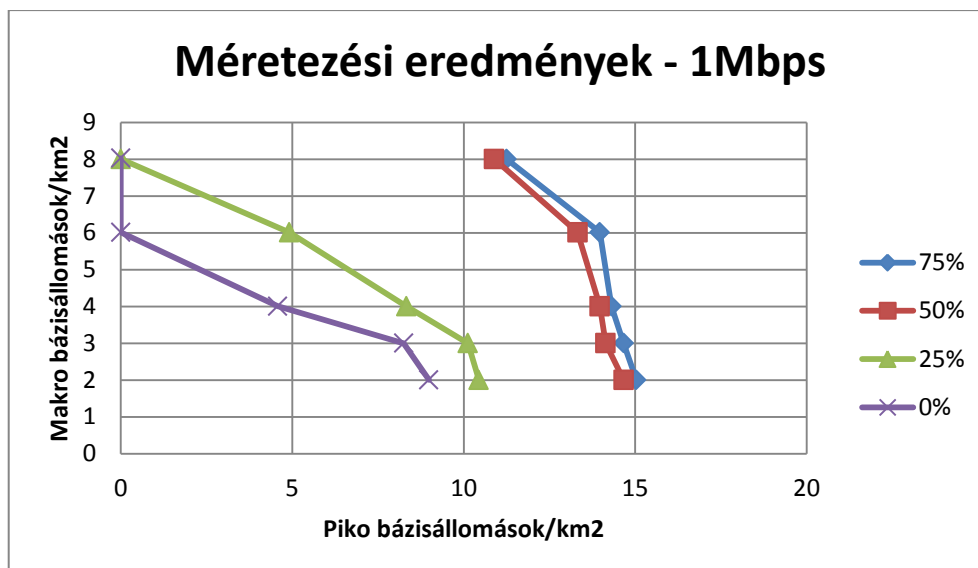


23. ábra Méretezési eredmények 1Mbps-es adatsebesség igény mellett

A mai gyakorlatban egy ilyen, sűrűn lakott nagyvárosi területen hozzávetőlegesen 2-4 (makro) bázisállomás található, így a szükséges piko cellák számát ezen makro cella sűrűség, illetve a bázisállomások bizonyos mértékű további sűrítése mellett vizsgáltam.

Jól látható, hogy a makro bázisállomások sűrítésével egy kapacitássűrűség eléréséhez a kültéri kis cellákat elég ritkábban elhelyezni, vagyis a sűrűségüket csökkenteni. A „görbe meredeksége” első pillantásra meglepő, azt várhatnánk, hogy a makrocellák számának csökkentése a kiscellák számának meredekebb növekedését idézi elő – a beltéri felhasználók jelenléte magyarázza a látottakat.

A következő ábrákon az látható, hogy mi történik, ha a beltéri felhasználók arányát 25, 50, majd 75%-ra növelem:



24. ábra Méretezési eredmények különböző felhasználóarányok esetén

Megfigyelhető, hogy minél több felhasználó tartózkodik épületben, annál több kültéri kiscellára van szükség egy adott makro bázisállomás sűrűség mellett.

Ez az eredmény azzal magyarázható, hogy a beltéri felhasználók számának növelésével egyre több felhasználónak rosszabb SINR értéke lesz és így ezeknek a sáv szélesség igénye is megnő, ami azt eredményezi, hogy hiába csökken azon felhasználók száma, akik kültéri bázisállomáshoz fognak kapcsolódni, az össz sáv szélesség igényük nőni fog. Ezért fog egy adott makro bázisállomás sűrűség mellett a kültéri kis cellák sűrűsége nőni, ha egyre több felhasználó tartózkodik épületben.

A következő táblázatban illusztrálom a beltéri bázisállomások számának változását a felhasználók arányának változásának függvényében:

Beltéri felhasználók aránya:	25%	50%	75%
Aktív beltéri egységek sűrűsége [km ²]	294	535	835

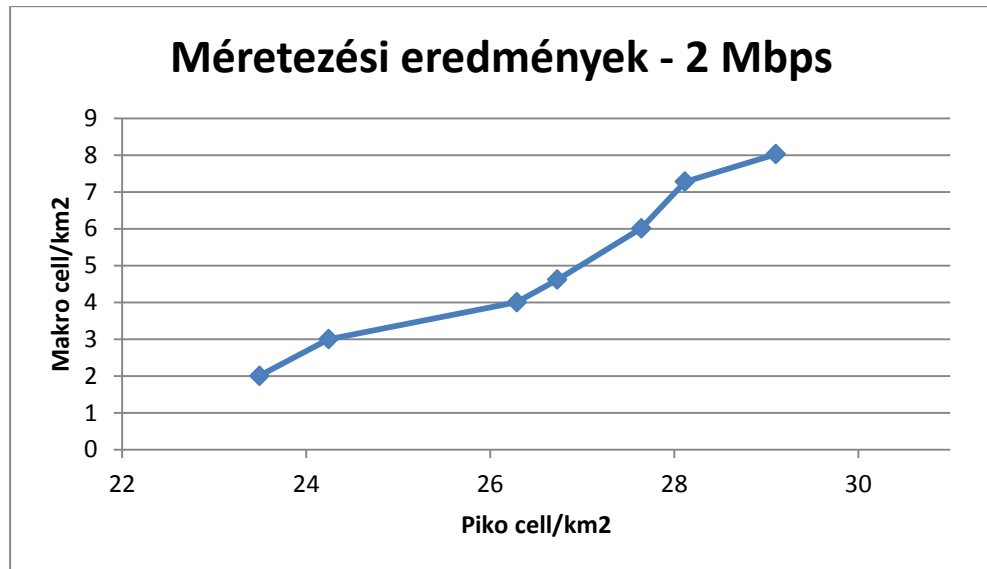
2. táblázat Beltéri egységek számának változása

Jól látható, hogy a beltéri femtocellák sűrűsége nagymértékben nő a beltéri felhasználók arányának növelésével. Ezen ok miatt kijelenthető, hogy a méretezés eredményét nagyban befolyásolja, hogy a felhasználók milyen arányban oszlanak beltéri és kültéri felhasználókra.

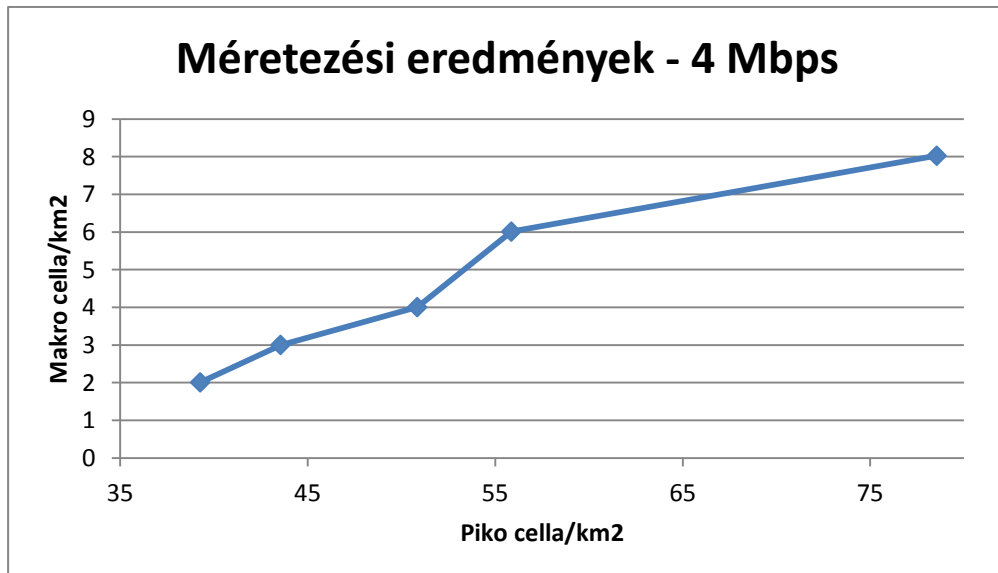
A továbbiakban az 50% -os bel- és kültéri felhasználóarányal számoltam.

A következő részben azt vizsgáltam, hogy miként változnak a méretezési eredmények, ha a felhasználói adatsebesség igényt megnövelem először 2 majd 4 Mbps-ra. Azt váránk, hogy az 1 Mbps-hoz képest adott makro bázisállomás sűrűség mellett több kis cella szükséges és a makro bázisállomások sűrítésével egyre kevesebb

A következő ábrákon láthatóak az eredmények:



25. ábra Méretezési eredmény 2 Mbps-os adatsebesség igény mellett

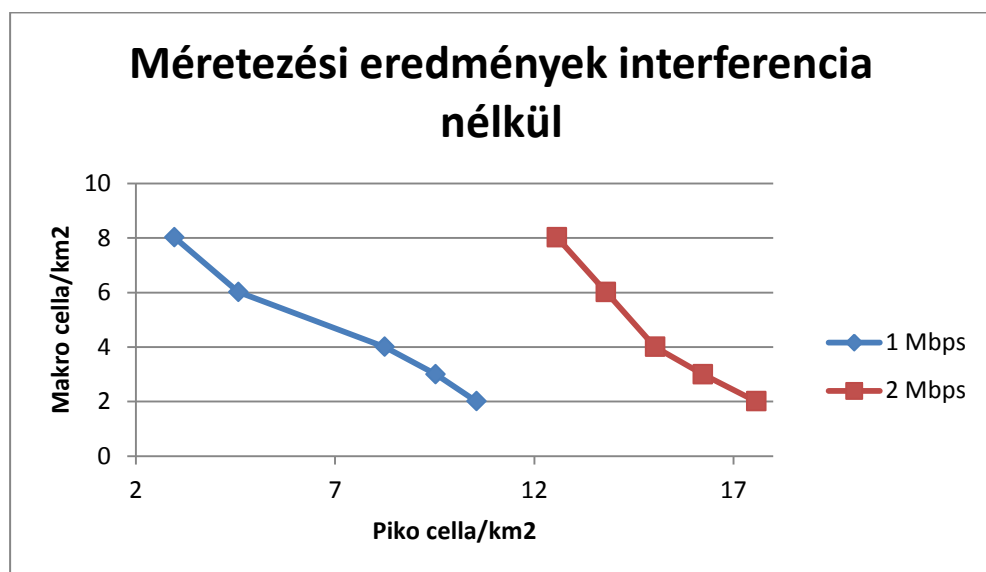


26. ábra Méretezési eredmény 4 Mbps-os adatsebesség igény mellett

Az ábrákon jól látható, hogy adott makro bázisállomás sűrűségénél az adatsebesség igény növelésével, szemmel láthatóan nagyobb piko bázisállomás sűrűséget kapunk.

Azonban a görbe várakozásainkkal ellentétes jelleget mutat: minél jobban sűríttem a makro bázisállomásokat annál több piko bázisállomásra van szükség. Ennek a jelenségnek az okát kutatva eljutottam az SINR értékek érdekes változására. Megnéztem, hogy a szimuláció során, hogyan változnak az SINR értékek, ha ugyanazon piko cella sűrűség mellett, a makro bázisállomások sűrűségét növelem. Azt figyeltem meg, hogy sűrítéskor a felhasználók SINR értéke leromlik (csökken). Ennek az okát kutatva először megnéztem a méretezőkor kapott SINR értéket akkor, amikor csak makro bázisállomások vannak és akkor, amikor csak piko cellák. Mind a két esetben a makro cellák sűrítésekor az SINR értékek javultak.

Ezen vizsgálatok elvégzése után megállapítottam, hogy egy bizonyos antenna sűrűség fölött a piko és a makro cellák annyira zavarják egymást, hogy az interferencia növekedése nagyobb, mint a hasznos jel növekedése. Ez a jelenség természetesen azért tudott kialakulni, mivel a piko bázisállomások és a makro bázisállomások ugyanazt a frekvenciasávot használják. A következő ábrán látható, hogy mi történik, ha a makro bázisállomás az 1800MHz-es tartományban, míg a piko bázisállomás a 2600MHz-es tartományban működik, tehát nincs interferencia a két cella típus között:



27. ábra Méretezési eredmény interferencia nélkül

Jól látható, hogy ebben az esetben az előzetes várakozásoknak megfelelő összefüggést kaptunk a makro és kiscellák száma között: sűrűbb makro cellás hálózat mellett kevesebb pikocella is elegendő az igényelt forgalmi kapacitás biztosításához.

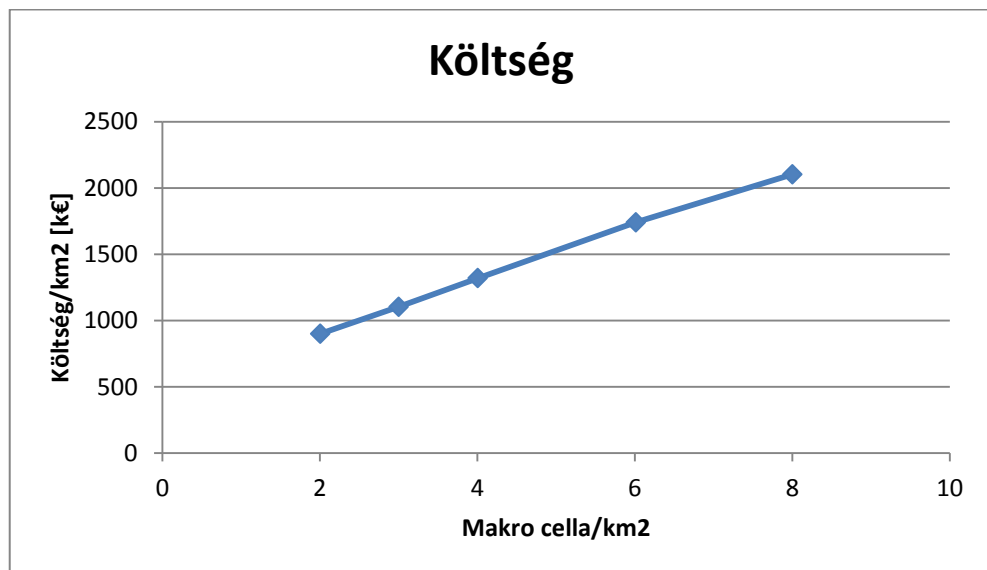
5.3 Költségek összehasonlítása

A költségek egyszerűsített meghatározásához egy 2014-es nemzetközi konferenciákban megjelenő költségadatbázist használtam [31]. A következő táblázat az általam használt költségeket mutatja (az egyszerűsített nézet lényegileg egybecseng több, részletesebb költségelemeket bemutató white paper és költségelemző tanulmány költségadataival [5]).

Technológia:	Teljes költség [k€]:
Makro (3 szektor):	220,15
Piko bázisállomás:	31,26

3. táblázat Egységköltségek

Érdekesség, hogy egy makro bázisállomás költsége hétszerese egy piko bázisállomásénak. Ebből az következik, hogy egy makro bázisállomást akkor érdemes telepíteni hét piko bázisállomás helyett, ha legalább annyi felhasználót ki tud szolgálni, mint hét piko bázisállomás. Ha a méretezési eredményeimet összevetem ezeket az egységköltségeket, akkor a következő ábrát kapom:

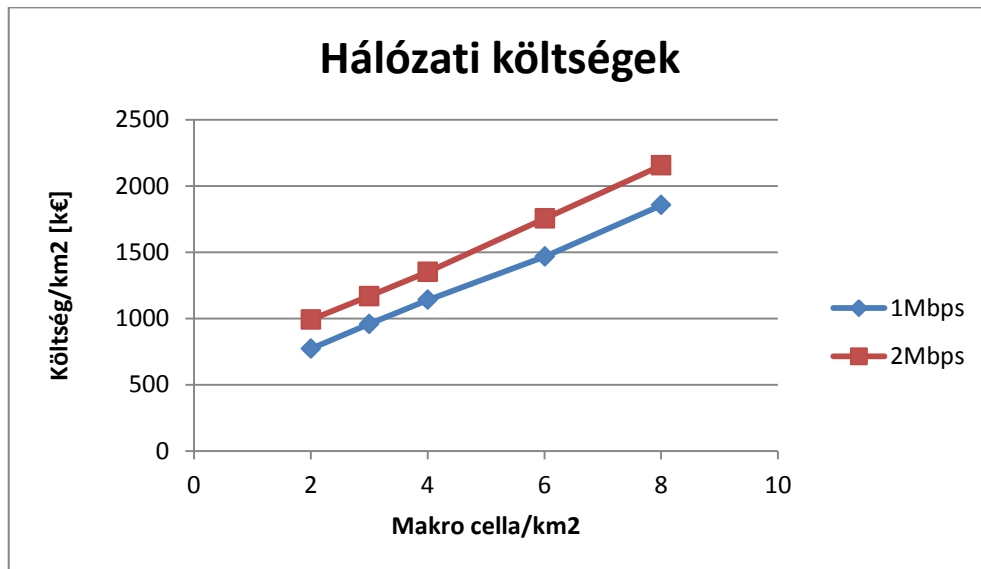


28. ábra Költségelemzés 1 Mbps-os adatsebesség igény mellett

Az ábrán az 50%-os felhasználóarány mellett láthatóak a km²-re számolt költségek az előző fejezetben ismertetett konfigurációk mellett. Azt látjuk az ábrán, hogy a költségek a makro bázisállomások sűrítésével nőnek, vagyis egy makro

bázisállomás nem képes a költségárányoknak megfelelően több felhasználót kiszolgálni egy piko cellánál.

A következő ábrán azt mutatom be, hogy (az egyszerűség kedvéért az interferencia hatását elhanyagolva) hogyan változnak a hálózat költségei az adatsebesség igény növelésével:



29. ábra Költségelemzés interferencia nélkül

Látható, hogy a trend nem változik, vagyis egy makro bázisállomás ebben az esetben sem képes hétszer több felhasználót kiszolgálni egy piko bázisállomásnál.

Természetesen minden költségadat bizonyos mértékig bizonytalan vagy vitatható, de általános tanulságként egyértelmű, hogy amíg egy makrocella telepítési és fenntartási költségei nagyobb mértékben haladják meg egy kültéri kiscelláét, mint a kettő közötti kapacitás-különbség, addig a forgalmi igények növekedése elsődlegesen a kiscellák sűrűbb telepítését indokolja. Értelemszerűen további szolgáltatási követelmények (rendelkezésre állás, lefedettség, handover-támogatás, stb.) ettől függetlenül szükségessé tehetik a makro cellás réteg sűrítését.

A továbbiakban érdekes lehet még megfigyelni, hogyan növekszik a költség az adatsebesség igény növekedésének hatására. A következő táblázat mutatja a pontos költségértékeket abban az esetben, ha 2 makro bázisállomás, valamint a szükséges számú piko cella található km²-enként:

Adatsebesség igény:	1Mbps	2Mbps
Költség/km ² [k€]	771,48	990,92

4. táblázat Költségek változása az adatsebesség igény függvényében

Látható, hogy az adatsebesség igény megduplázásával nem egyenesen arányosan növekednek a költségek. Jelen esetben a költségnövekedés 28%, míg az adatsebesség igény növekedése 100%. Mindezek mellett ez a költségnövekedés is figyelemre méltó, és érthető módon aggodalommal töltheti el a szolgáltatókat, mivel a forgalmi előrejelzések állandó, exponenciális növekedéssel számolnak.

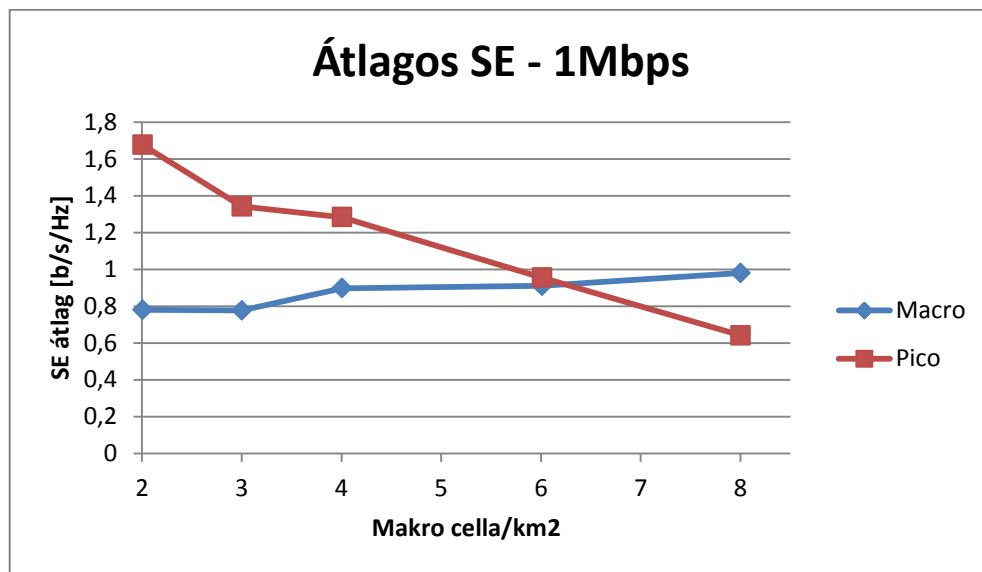
Végül, a költségek vizsgálata során fontos megemlítenünk, hogy a napi gyakorlatban egy működő szolgáltató nem új hálózatot telepít, hanem a meglévőt bővíti, egyfajta „brownfield” beruházást hajt végre, hiszen a jelenlegi mobilszolgáltatóknak már van egy viszonylag jól lefedett hálózata. Ezek főként 3 szektoros makro bázisállomásokat tartalmaznak. Ezek telepítési költségei lényegesen alacsonyabbak, mint egy új makro bázisállomás létesítése. Ha egy ilyen létező hálózatot szeretnénk fejleszteni, hogy nagyobb kapacitást tudjon kezelni, akkor a modellemből illetve a költségadatbázisból az következik, hogy a meglévő makro bázisállomások továbbfejlesztése mellett egyértelműen új kis cellák sűrítésével lehet elérni a kívánt kapacitásbővülést.

Fontos megemlíteni, hogy a beltéri femtocellák vagy Wi-Fi AP-k költsége nem szerepel a fenti költség-számításokban. Ennek oka kettős: egyrészt adott beltéri lefedettséget feltételezve ezen eszközök költsége lényegében konstans, másrészt a mai gyakorlat szerint (különösen Wi-Fi esetén) az otthoni eszközök sok esetben a felhasználó tulajdonában állnak, vagy a szolgáltató egy csatlakozási díj formájában lényegében az előfizetőre hárítja annak költségét.

5.4 A méretezés hatására történő spektrális hatékonyság változás

Ebben az alfejezetben azt írom le, hogy hogyan változik az átlagos spektrális hatékonyság a kültéri piko illetve makro bázisállomásokhoz azok sűrűsége (és így a cellasugár, a felhasználók átlagos távolsága) függvényében; illetve a két átlagos spektrális hatékonyság aránya hogyan változik.

Az átlagos spektrális hatékonyságot a következő módon számoltam ki: a szimuláció során eltároltam, hogy a bázisállomásokhoz hány felhasználó csatlakozott, illetve, hogy egy bázisállomás mekkora adatsebességet tudott kiszolgálni (a rendelkezésre álló 20 MHz spektrum felhasználásával). Ezután külön a kiscellákra és külön a makro cellákra számoltam egy átlagos spektrális hatékonyságot, majd ezeket átlagoltam. Így megkaptam a piko bázisállomások és a makro bázisállomások átlagos spektrális hatékonyságát. Ezt az átlagot kiszámoltam több konfigurációra és az eredményt ábrázoltam egy diagramon, amely a következő ábrán látható:

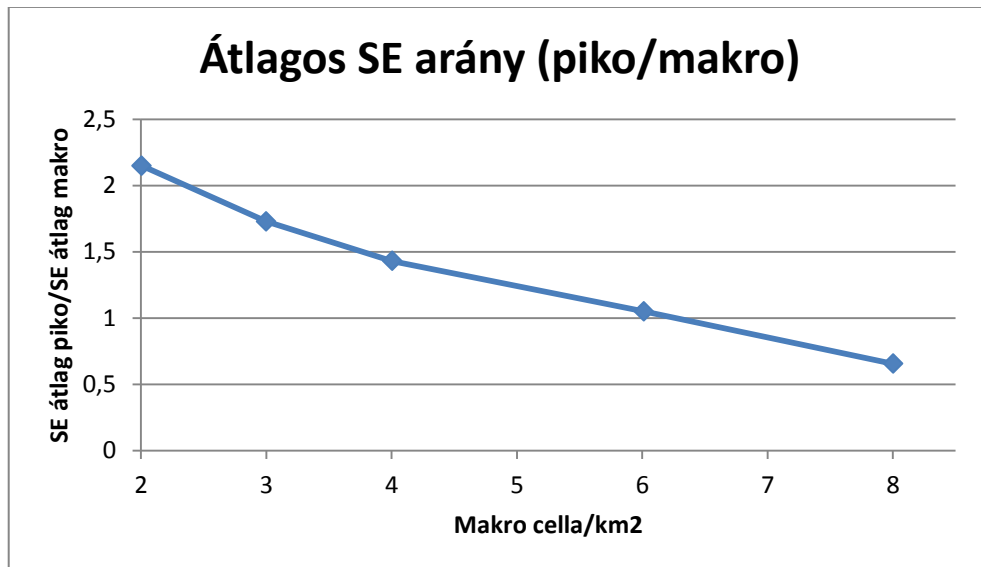


30. ábra Átlagos spektrális hatékonyság

Megfigyelhető a diagramon, hogy a makro bázisállomások sűrítésével a makro bázisállomásokhoz tartozó felhasználók átlagos spektrális hatékonysága egy kicsit növekszik, míg a piko bázisállomásokhoz tartozó felhasználók átlagos spektrális hatékonysága csökken. Ez azzal magyarázható, hogy egyre több felhasználó kapcsolódik a makro bázisállomásokhoz, mivel sűrűségük növekszik. A fenti ábra egyben a „túl sűrű” hálózatban tapasztalt, előzőekben tárgyalt probléma hátterére is rávilágít. Megfigyelhető, hogy a makro cellák sűrítésével az ott tapasztalt spektrális hatékonyság nyereség nem kompenzálja a piko cellákon elszenvedett veszteséget, azaz a kék görbe kisebb meredekséggel növekedik, mint ahogy a piros csökken – összességében tehát a tapasztalt átlagos spektrális hatékonyság romlik.

Egy iparági szereplővel (Ericsson Svédország) való konzultáció alapján az ipari tapasztalat szerint ma egy LTE makro bázisállomás átlagos spektrális hatékonysága 1 b/s/Hz, míg a kis celláké 1,25 b/s/Hz. Jól látható az előző ábrán, hogy az általam

számolt átlagos spektrális hatékonyságok is ezen értékek körül mozognak. A következő ábrán a két átlagos spektrális hatékonyságnak az arányát ábrázoltam. Ezen az ábrán is jól látható, hogy nagyságrendileg az ipari partnerektől kapott eredményt kaptam, amely a modell helyes működését bizonyítja.



31. ábra Átlagos spektrális hatékonyság arány

6 Kitekintés, az 5G hálózat forgalmi igénye

Az NGMN 5G White Paper [29] által definiált 5G mobilhálózat forgalmi igényeit a következő táblázatban röviden ismertetem. A forgalmi terheléshez igazodó antenna-konfiguráció a COMBO projekt, és a meghatározó európai készülékgyártó Ericsson előrejelzésén alapul [2].

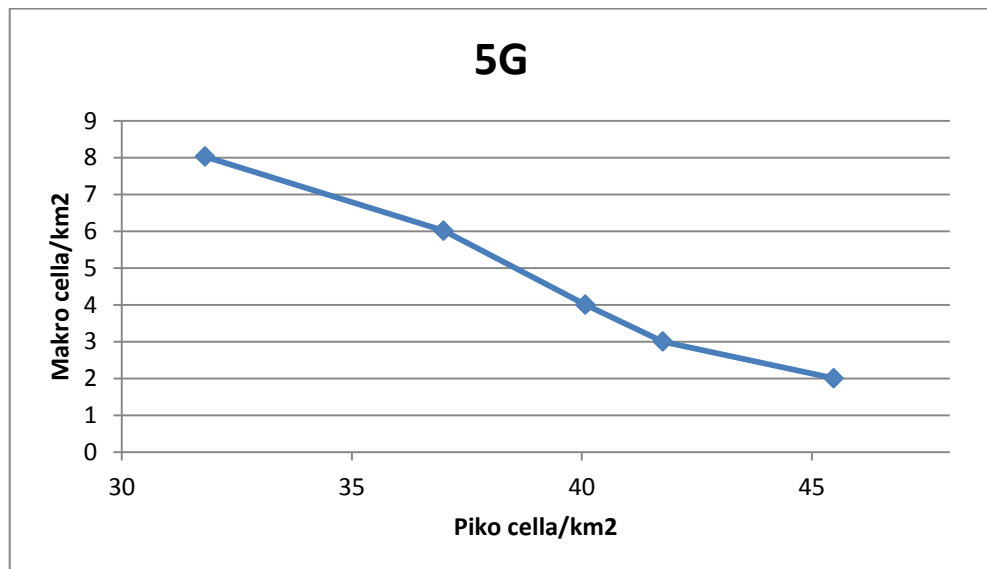
Frekvenciasáv:	3,5GHz
Sávszélesség:	250MHz
MIMO:	16x16
Kódolás:	256QAM
Felhasználó/km²	200-2500
Adatsebesség igény:	300 Mbps

Kapacitássűrűség:

750 Gbps/km²

5. táblázat 2030-as előrejelzés a mobil hálózat adatsebesség igényére és erőforrására

Méretezéseket végeztem az implementált modellel a fenti előrejelzéseket figyelembe véve. A számítások egyszerűsítése érdekében ezúttal nem helyeztem el beltéri felhasználókat, illetve utcákat és épületeket. A kültéri felhasználók az előre definiált területen egyenletes eloszlás szerint helyezkednek el. Az ábrán látható, hogy a megnövekedett rendelkezésre álló erőforrás mellett a kiscellák sűrűsége is jelentősen megnövekedett – annak ellenére, hogy ebben az esetben a makro és pikocellák kapacitása jelentősen magasabb. A megnövekedett rádiós sávszélesség (20 MHz helyett 250 MHz) és a magasabb rendű MIMO (4x4 helyett 16x16) eredményeként a szektoronkénti elvi maximális kapacitás közel két nagyságrenddel magasabb.



32. ábra 5G-s forgalmi igényre való méretezés

7 Összegzés

Dolgozatomban bemutattam egy olyan heterogén mobil hozzáférési hálózati méretező modult, amely a korábbi munkáimhoz képest jelentős továbblépést jelent, többek között a kül- és beltéri felhasználók modellezésével, az épületfalak csillapításának figyelembe vételével, valamint a MIMO antenna-konfigurációk hatása révén. Egy szabályos elrendezésű területen végez méretezési számításokat, a felhasználók véletlen elhelyezkedése során követve az úthálózat struktúráját, illetve az épületek és háztartások elhelyezkedését. Az LTE makro cellás hálózatot outdoor LTE kiscellás hálózattal és beltéri egységekkel egészítettem ki. A modell képes meghatározni különböző bemeneti forgalmi kapacitás minták mellett méretezési eredményeket figyelembe véve a technológiai paramétereket, a vizsgált terület földrajzi tulajdonságait, az interferencia hatását és az épületek csillapítását. Az elkészült modellben az LTE makro bázisállomások három szektorsugárzó antennával karakterisztikát, míg a piko bázisállomások gömbsugárzó antennával rendelkeznek.

Az elkészült modell segítségével végeztem méretezési számításokat különböző forgalomsűrűségekre, majd a kapott eredményeket elemezve vontam le következtetéseket. Megfigyeltem, hogy a makro bázisállomások egy bizonyos határon túl történő sűrítése után az azonos frekvenciában sugárzó makro és piko bázisállomások közti interferencia olyan mértékben zavaróvá válik, hogy bizonyos terhelés (forgalomsűrűség) mellett a makro cellák sűrítése már nem csökkentette a szükséges kiscellák számát.

Megvizsgáltam, hogy a hálózat költségei hogyan alakulnak, ha egy adott adatsebesség igényt különböző konfigurációkkal szolgálom ki. Megállapítottam, hogy a makro bázisállomások sűrítése a jelenlegi költségviszonyok mellett gazdaságilag nem indokolt, a meglévő bázisállomások továbbfejlesztése mellett inkább új piko cellák telepítése ajánlott. Megvizsgáltam, hogy a heterogén rádiós hozzáférési hálózat költségei hogyan változnak a növekvő forgalmi terhelés hatására.

A spektrális hatékonyság és a cellasűrűség (azaz a cellaméret) közti összefüggéseket is vizsgáltam, és megfigyeltem, hogy a kis és a makro cellákhoz csatlakozó felhasználók spektrális hatékonyságának aránya hogyan változik különböző makro/piko bázisállomás sűrűségek (és cellaméret) mellett.

Végezetül egy kitekintést tettem az NGMN által megfogalmazott, az 5G forgalmi és technológiai követelmények hatására. Bár sok bizonytalanság övezi a jövő 5G hálózatának részleteit, és egyértelmű, hogy több dimenziójában eléri a jelen dolgozatban bemutatott számítási modellek határait, érdekes látni, hogy még jelentősen fejlettebb rádiós átvitel és antennarendszerek mellett is érezhetően magasabb cellasűrűséget tesz szükségessé.

8 Irodalomjegyzék

- [1] „Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018, Cisco, USA, 2014.
- [2] Ericsson Mobility Report, June 2015.
- [3] R. Ratasuk, M. A. Uusitalo, N. Mangalvedhe, A. Sorri, S. Iraj, C. Wijting és A. Ghosh, „License-Exempt LTE Deployment in Heterogeneous Network,” IEEE, 2012.
- [4] M. Bennis, M. Simsek, W. Saad, S. Walid, M. Debbah és A. Czylik, „When Cellular Meets WiFi in Wireless Small Cell,” 2013.
- [5] Monica Paolini, „The economics of small cells and Wi-Fi offload”, SenzaFili Consulting White Paper, 2012
- [6] P. Ratkóczy és A. Mitsenkov, „Joint Dimensioning of Outdoor Heterogeneous Radio Access Networks (HetNet) Using Monte Carlo Simulation,” in MACRO, Târgu Mureş, 2015.
- [7] P. Ratkóczy, „Kültéri heterogén mobil hozzáférési hálózatok méretezése Monte Carlo szimuláció segítségével,” TDK, Budapest, 2014.
- [8] U. Barth, „3GPP Long-Term Evolution / System architecture Evolution Overview,” Alcatel, 2006.
- [9] Maradevis-Rethink, „Backhaul Research Service - Fronthaul Trends in the Small Cell Era,” 2012.
- [10] D. López-Pérez, I. Güvenc, Guillaume de la Roche, M. Kountouris, T. Q.S. Quek és J. Zhang, „Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks,” IEEE Wireless Communications, 2011.
- [11] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfröjd és T. Svensson, „The Role of Small Cells, Coordinated Multipoint, and Massive MIMO in 5G,” IEEE Communications Magazine, 2014.
- [12] IEEE Wireless Standards - 802.11a, 802.11b/g/n, and 802.11ac
- [13] I. Poole, „IEEE 802.11 standards tutorial,” [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php> [Hozzáférés dátuma: 16 október 2014].
- [14] A. S. T. Online, „Macmagazin,” [Online]. Available: <http://www.macmagazin.hu/ieee80211/>. [Hozzáférés dátuma: 2 május 2015].
- [15] M. V. a. J. N. Syed Fahad Yunas, „Spectral and Energy Efficiency of Ultra-Dense Networks under Different Deployment Strategies,” IEEE Communications Magazine, 2015.
- [16] D. Chafekar, V. Kumar, M. V. Marathe, S. Parthasarathy és A. Srinivasan, „Capacity of Wireless Networks under SINR Interference,” Wireless Networks, Vol. 17, Issue 7., 2011.
- [17] B. T. F. Intézet, „Fizipédia,” [Online]. Available: http://fizipedia.bme.hu/index.php/A_zaj_mint_jel. [Hozzáférés dátuma: 16 október 2014].
- [18] 3GPP, „3GPP TR 25.996 V10.0.0 (Release 10),” 2011.
- [19] A. A. J. N. V. Syed Fahad Yunas, „Deployment Strategies and Performance Analysis of Macrocell and Femtocell Networks in Suburban Environment with Modern Buildings,” in 10th IEEE International Workshop on Performance and Management of Wireless and Mobile Networks, Edmonton, Canada, 2014.
- [20] E. O. T. K. é. K. F. Y. Okumura, „Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service,” Rev. Elec. Comm. Lab., pp. 825-873., 1968.

- [21] M. Hata, „Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” IEEE Trans. Veh. Tech., pp. 317-325, 1980.
- [22] L. C. E. Damosso, „Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems Communications,” Brussels, Belgium, 1999.
- [23] I. T. Péter Fazekas, „An energy efficient cellular mobile network planning algorithm”, VTC Spring, 2011
- [24] C. B. V. K. A. P. G. T. Antonios Alexiou, „Spectral Efficiency Performance of MBSFN-enabled LTE Networks,” in 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2010.
- [25] I. Cisco Systems, „Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide, Release 7.3,” Cisco Systems, Inc., San Jose, USA, December 05, 2012.
- [26] A. Mitsenkov, „Efficient topology design methods for Next Generation Access Networks, Ph. D. Dissertation,” Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2014.
- [27] I. Pupaleski, Monte Carlo Simulation for UMTS capacity planning in one. [Performance]. Telekom Slovenia Group.
- [28] S. Raychaudhuri, „Introduction to Monte Carlo Simulation,” in IEEE, 2008.
- [29] Rachid El Hattachi/ Javan Erfanian, „NGMN 5G White Paper”, 2015.
- [30] EU FP7 ICT COMBO Project, <http://www.ict-combo.eu/>
- [31] Vladimir Nikolikj, Toni Janevski; A Cost Modeling of High-Capacity LTE-Advanced and IEEE 802.11ac based Heterogeneous Networks, Deployed in the 700 MHz, 2.6 GHz and 5 GHz Bands, 2014 International conference on selected topics in Mobile and Wireless Networking
- [32] Erik G. Larsson, Ove Edfors and Fredrik Tufvesson, Thomas L. Marzetta, „Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems”, IEEE Communications Magazine, 2014
- [33] Saurabh Dixit, Himanshu Katiyar, „MU-MIMO vs SU-MIMO in 4G networks”, IOCRSEM 2014
- [34] 3GPP, LTE-Advanced Standards

9 Ábrajegyzék

1. ábra Heterogén mobil hozzáférési hálózat.....	6
2. ábra Hasznos jel és interferencia ábrázolása.....	11
3. ábra LTE cellák elhelyezkedése	13
4. ábra 3 szektoros sugárzó karakterisztikája [16].....	15
5. ábra 3-szektorsugárzó antennák elhelyezkedése [18].....	15
6. ábra Szektorsugárzó SINR képe [mera.com].....	16
7. ábra COST231-Okumura-Hata modell.....	18
8. ábra Alpha-Shannon Formula [24]	19
9. ábra 802.11a spektrális hatékonyság	20
10. ábra MIMO	21
11. ábra A vizsgált terület.....	23
12. ábra Kültéri felhasználók térbeli eloszlása	25
13. ábra Hexagonális cellák elhelyezése.....	26
14. ábra Referencia piko bázisállomás elhelyezése	27
15. ábra $Q=3$ esetén a makro és piko bázisállomások elhelyezése.....	27
16. ábra Piko bázisállomáshoz való kapcsolódás	29
17. ábra A makro bázisállomások interferenciája.....	30
18. ábra Távoli makro bázisállomáshoz való kapcsolódás	31
19. ábra Piko bázisállomás interferenciája LTE bázisállomáshoz való kapcsolódáskor	32
20. ábra A felhasználó a piko bázisállomás hatósugarán kívül helyezkedik el	32
21. ábra A kültéri felhasználók kcscsolódása kültéri bázisállomásokhoz	34
22. ábra A szimuláció folyamatábrája	36
23. ábra Méretezési eredmények 1Mbps-es adatsebesség igény mellett	39
24. ábra Méretezési eredmények különböző felhasználóarányok esetén	40
25. ábra Méretezési eredmény 2 Mbps-os adatsebesség igény mellett.....	41
26. ábra Méretezési eredmény 4 Mbps-os adatsebesség igény mellett.....	41
27. ábra Méretezési eredmény interferencia nélkül	42
28. ábra Költségelemzés 1 Mbps-os adatsebesség igény mellett.....	43
29. ábra Költségelemzés interferencia nélkül	44
30. ábra Átlagos spektrális hatékonyság.....	46

31. ábra Átlagos spektrális hatékonyság arány	47
32. ábra 5G-s forgalmi igényre való méretezés	48

10 Táblázatjegyzék

1. táblázat IEEE 802.11 szabvány fontosabb tulajdonságai	9
2. táblázat Beltéri egységek számának változása.....	40
3. táblázat Egységköltések	43
4. táblázat Költségek változása az adatsebesség igény függvényében	45
5. táblázat 2030-as előrejelzés a mobil hálózat adatsebesség igényére és erőforrására..	48