





**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL AŞIRI YOĞUN HETEROJEN HABERLEŞME  
AĞLARINDA STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ İLE  
BAZ İSTASYONLARI YERLEŞİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mine ARDANUÇ**

**Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı**

**Bilgi Güvenliği Mühendisliği ve Kriptografi Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL AŞIRI YOĞUN HETEROJEN HABERLEŞME  
AĞLARINDA STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ İLE  
BAZ İSTASYONLARI YERLEŞİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mine ARDANUÇ  
(707141008)**

**Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı**

**Bilgi Güvenliği Mühendisliği ve Kriptografi Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Lütfiye DURAK ATA**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Bilişim Enstitüsü'nün 707141008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi MİNE ARDANUÇ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YENİ NESİL AŞIRI YOĞUN HETEROJEN HABERLEŞME AĞLARINDA STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ İLE BAZ İSTASYONLARI YERLEŞİMİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Lütfiye DURAK ATA** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Berk CANBERK** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Eylem ERDOĞAN** .....  
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **3 Mayıs 2019**  
**Savunma Tarihi :**    **10 Haziran 2019**







*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Tez danışmanım Prof. Dr. Lütfiye Durak Ata'ya tez dönemim boyunca sınırsız desteği, hoşgörüsü, sabrı ve kıymetli önerileri için teşekkür ederim. Değerli tavsiyeleri sayesinde araştırmalarım hep daha iyisini elde etmeye çalıştım. Ayrıca bu tez dönemim boyunca yaşadığım zorluklar karşısında yanımda olup beni desteklediği, motive ettiği ve yüksek lisans programımı bitirmemde büyük katkısı olduğu için kendisine şükran borçluyum. Tez danışmanım dışında Dr. Mehmet Başaran'a tez dönemim boyunca yaptığımız çalışmalarda faydalı tavsiyeleri, desteği ve özverisi için çok teşekkür ederim. İTÜ Vodafone Future Lab Ar-Ge programı kapsamında İTÜ Bilişim Enstitüsü ve Vodafone tarafından birlikte yürütülen ITUVF20180701P06 numaralı proje ile sağladığı finansal destekten ötürü Vodafone Telekomünikasyon A.Ş.'ye teşekkür ederim. Bununla birlikte üyesi olduğum İTÜ Bilgi ve Haberleşme Araştırma Grubu'ndaki takım arkadaşlarıma da teşekkür etmek isterim. Son olarak ise maddi ve manevi olarak daima yanımda olan değerli aileme teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2019

Mine ARDANUÇ



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>KISALTMALAR</b> .....	xi
<b>SEMBOLLER</b> .....	xiii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xv
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xvii
<b>ÖZET</b> .....	xix
<b>SUMMARY</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması .....	1
1.3 Katkı .....	4
1.4 Tez Organizasyonu .....	5
<b>2. AŞIRI YOĞUN HETEROJEN AĞLAR</b> .....	<b>7</b>
2.1 Baz İstasyonu Çeşitleri .....	7
2.1.1 Makro baz istasyonları (MBS) .....	7
2.1.2 Küçük baz istasyonları (SBS).....	7
2.1.2.1 Piko baz istasyonları (PBS) .....	7
2.1.2.2 Femto baz istasyonları (FBS) .....	8
<b>3. STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Poisson Voronoi Mozaiği.....	11
3.2 Poisson Nokta Süreci.....	11
3.3 Poisson Boşluk Süreci .....	13
3.4 Sabit Çekirdekli Nokta Süreci .....	14
3.4.1 Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip - I .....	14
3.4.2 Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip - II .....	14
3.4.3 Basit sıralı engelleme süreci .....	15
<b>4. AŞIRI HETEROJEN AĞLARDA STOKASTİK GEOMETRİ ANALİZİ</b> ...	<b>17</b>
4.1 Sistem Modeli.....	17
4.1.1 Ağ modeli .....	17
4.1.2 Kanal ve güç tüketim modeli.....	18
4.2 Ağ Performans Ölçütleri.....	20
4.2.1 Kapsama ve kesinti olasılığı .....	20
4.2.2 Minimum erişilebilir veri oranı .....	21
4.2.3 Minimum erişilebilir veri hacmi.....	21
4.2.4 Alan spektral verimliliği.....	21
4.2.5 Ağ enerji verimliliği .....	22

<b>5. BENZETİM ANALİZİ VE SONUÇLARI .....</b>	<b>23</b>
5.1 PPP Modeline Dayalı Benzetim Sonuçları.....	23
5.2 HCPP Modeline Dayalı Benzetim Sonuçları .....	26
5.3 HCPP ve PPP Modellerine Dayalı Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırması ..	31
<b>6. SONUÇLAR.....</b>	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>49</b>



## KISALTMALAR

<b>5G</b>	: 5. Nesil (5th Generation)
<b>BS</b>	: Baz İstasyonu (Base Station)
<b>HCPP</b>	: Sabit Çekirdekli Nokta Süreci (Hard-Core Point Process)
<b>HetNet</b>	: Heterojen Ağ (Heterogeneous Network)
<b>MBS</b>	: Makro Baz İstasyonu (Macro Base Station)
<b>MHCPP-I</b>	: Matérn Sabit Çekirdekli Nokta Süreci-I (Matérn Hard-Core Point Process-I)
<b>MHCPP-II</b>	: Matérn Sabit Çekirdekli Nokta Süreci-II (Matérn Hard-Core Point Process-II)
<b>PBS</b>	: Piko Baz İstasyonu (Pico Base Station)
<b>PHP</b>	: Poisson Boşluk Süreci (Poisson Hole Process)
<b>PP</b>	: Nokta Süreci (Point Process)
<b>PPP</b>	: Poisson Nokta Süreci (Poisson Point Process)
<b>SBS</b>	: Küçük Baz İstasyonu (Small Base Station)
<b>SINR</b>	: İşaret-Girişim-Gürültü Oranı (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
<b>SIR</b>	: İşaret-Girişim Oranı (Signal-to-Interference Ratio)
<b>SSI</b>	: Basit Sıralı Engelleme (Simple Sequential Inhibition)





## SEMBOLLER

$\alpha$	: Yol kaybı katsayısı
$k$	: Heterojen ağdaki katman sayısı
$P_{t,k}$	: k. katmandaki iletim güç tüketimi
$\lambda$	: Yoğunluk
$\zeta$	: Ağ trafik yüküne bağlı güç tüketimi katsayısı
$\phi$	: Stokastik geometri süreci
$P_{c,k}$	: k. katmandaki statik güç tüketimi
$\gamma$	: SIR eşik değeri
$b$	: Dışlanım bölgesi tasarım faktörü
$D$	: Dışlanım bölgesi yarıçapı
$W$	: Sistem bant genişliği
$r_h$	: Sabit çekirdekli mesafe



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 5.1:</b> PPP benzetiminde kullanılan parametreler.....	23
---	----





## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Şekil 1.1</b> : Kırsal alandaki gerçek baz istasyonu yerleşimi ve RPP modeline göre dağıtılan baz istasyonlarının yerleşimi. ....	3
<b>Şekil 2.1</b> : HetNet modeli örneği .....	8
<b>Şekil 2.2</b> : Geleneksel homojen ağlardan aşırı yoğun ağlara geçiş.....	9
<b>Şekil 3.1</b> : Altıgen grid yapısı ve Poisson Voronoi mozaiği .....	12
<b>Şekil 3.2</b> : İki- katmanlı heterojen ağda Poisson boşluk süreci örneği .....	14
<b>Şekil 3.3</b> : İki-katmanlı HetNet'te (a) PPP, (b) MHCPP - I, (c) MHCPP - II, (d) SSI dağılımlarının Poisson Voronoi mozaiği üzerinde gösterimi. ....	15
<b>Şekil 5.1</b> : PPP modelinde $\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\gamma=0$ dB. ....	24
<b>Şekil 5.2</b> : PPP modelinde $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\gamma=0$ dB. ....	25
<b>Şekil 5.3</b> : PPP modelinde $\gamma$ 'ya göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_1=0.1$ . ....	25
<b>Şekil 5.4</b> : PPP modelinde $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\gamma=0$ dB. ....	26
<b>Şekil 5.5</b> : PPP modelinde $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\gamma=0$ dB. ....	27
<b>Şekil 5.6</b> : PPP modelinde $\gamma$ 'ya göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_1=0.1$ . ....	27
<b>Şekil 5.7</b> : PPP modelinde $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin kapsama olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	28
<b>Şekil 5.8</b> : PPP modelinde $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin kesinti olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	29
<b>Şekil 5.9</b> : PPP modelinde $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin minimum erişilebilir veri oranı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	30
<b>Şekil 5.10</b> : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ . $\gamma=0$ dB.....	31
<b>Şekil 5.11</b> : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ . $\gamma=0$ dB.....	32
<b>Şekil 5.12</b> : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\gamma$ 'ya göre değişen Ağ Enerji Verimliliği. $\rho_2/\rho_1=5$ .....	32
<b>Şekil 5.13</b> : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\gamma$ 'ya göre değişen Alan Spektral Verimliliği. $\rho_2/\rho_1=5$ .....	33
<b>Şekil 5.14</b> : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\gamma$ 'ya göre değişen kapsama olasılığı. $\rho_2/\rho_1=5$ . Teorik sonuçlar çizgi ile benzetim sonuçları ise işaretler ile gösterilmiştir. .	34

<b>Şekil 5.15</b>	: MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\gamma$ 'ya göre değişen kesinti olasılığı. $\rho_2/\rho_1=5$ . ....	34
<b>Şekil 5.16</b>	: MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_1=0.1$ , $\gamma=0$ dB. ....	35
<b>Şekil 5.17</b>	: MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_1=0.1$ , $\gamma=0$ dB. ....	35
<b>Şekil 5.18</b>	: MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte $\gamma$ 'ya göre değişen minimum erişilebilir veri oranı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	36
<b>Şekil 5.19</b>	: $\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ , $\gamma=0$ dB. ....	37
<b>Şekil 5.20</b>	: $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_1=0.1$ , $\gamma=0$ dB. ....	37
<b>Şekil 5.21</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen ağ enerji verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	38
<b>Şekil 5.22</b>	: $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ , $\gamma=0$ dB. ....	38
<b>Şekil 5.23</b>	: $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_1=0.1$ , $\gamma=0$ dB. ....	39
<b>Şekil 5.24</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen alan spektral verimliliği. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	39
<b>Şekil 5.25</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen MBS kapsama olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	40
<b>Şekil 5.26</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen PBS kapsama olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	40
<b>Şekil 5.27</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen MBS kesinti olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	41
<b>Şekil 5.28</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen PBS kesinti olasılığı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ....	41
<b>Şekil 5.29</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen MBS minimum erişilebilir veri oranı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ...	42
<b>Şekil 5.30</b>	: $\gamma$ 'ya göre değişen PBS minimum erişilebilir veri oranı. $\rho_2/\rho_1=2$ . ...	42

# YENİ NESİL AŞIRI YOĞUN HETEROJEN HABERLEŞME AĞLARINDA STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ İLE BAZ İSTASYONLARI YERLEŞİMİ

## ÖZET

Yüksek veri oranlı ağ servisleri ve erişimin her yerde olma ihtiyacının artması ile yeni nesil haberleşme ağı yapısına yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Baz istasyonlarının yoğunlaştırılması ile meydana gelen aşırı yoğun heterojen haberleşme ağ yapıları, telsiz ağ kapasite ihtiyacının karşılanması için 5G teknolojisinin gelecek vaadeden yöntemlerinden birisidir. Ancak baz istasyonlarının aşırı yoğun dağılımı sonucunda oldukça yüksek güç tüketimi ile birlikte kullanıcıların maruz kaldığı yüksek girişim sorunları meydana gelmektedir.

Büyük ölçüdeki ağ enerji tüketimini karşılamak adına aşırı yoğun heterojen haberleşme ağlarında baz istasyonu yerleşim teknikleri uygun bir çözüm yöntemi olarak düşünülmektedir ve bu alanda birçok ağ planlama stratejileri dikkat çekmektedir. En uygun ağ planlaması, farklı baz istasyonu tipi içeren yeni nesil çok katmanlı heterojen haberleşme ağları için gereklidir. Ağ topolojisindeki yerleşimin modellenmesi ve analizin ağdaki enerji tüketimine önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır.

Son yıllarda, stokastik geometri modelleri, heterojen ağlarda baz istasyonlarının yerleşimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modellerden biri olan bağımsız Poisson Nokta Süreci (Poisson Point Process, PPP) ağın modellenmesi ve performans analizi için yaygın olarak kullanılmıştır. Sebebi ise PPP'nin modellemede benzetim aşamasında kolaylık sağlaması ve ağ performans ölçütlerinin eldesinde çözümlenebilir olmasıdır. Buna rağmen PPP modeli, baz istasyonu dağılımı için pratik bir çözüm değildir. Çünkü gerçek hayatta makro baz istasyonları (Macro Base Station, MBS) ve küçük baz istasyonlarını (Small Base Station, SBS) içeren çok katmanlı heterojen ağlarda baz istasyonları PPP modelindeki gibi katmanlar arası birbirinden bağımsız değildir. Bununla birlikte baz istasyonları arasındaki girişimin azaltılması adına PPP modelindeki yerleşimin aksine baz istasyonları birbirine çok yakın konumlanmamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada, MBS'leri ve piko baz istasyonlarını (Pico Base Station, PBS) içeren iki katmanlı bir heterojen haberleşme ağı için PPP yerine Sabit Çekirdekli Nokta Süreci (Hard-Core Point Process, HCPP) ve Poisson Delik Süreci (Poisson Hole Process, PHP) stokastik geometri modelleri önerilmiştir.

MBS'ler arasındaki girişimi azaltmak ve PPP modelini iyileştirmek için PPP modelinden türetilen HCPP modelleri MBS'lere uygulanmıştır. Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip-I (Matérn Hard-Core Point Process Type-I, MHCPP-I), Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip-II (Matérn Hard-Core Point Process Type-II, MHCPP-II) ve basit sıralı engelleme süreci (Simple Sequential Inhibition, SSI) olmak üzere üç farklı HCPP modeli MBS'lere uygulanarak tüm durumlar karşılaştırılmıştır.

MBS'lerin HCPP dağılımlarından sonra, MBS'lere PBS'lerden gelen girişimi azaltmak ve katmanlar arası bağımlılığı sağlamak için ise PBS'ler PPP'den türetilen PHP modeline göre yerleştirilmiştir. Üstelik, PBS'lerin bu dağılımı ile

ađ topolojisindeki boşluklar doldurularak ađ kapasitesinin ve PBS'lerin kapsama olasılığının artırılması amaçlanmıştır.

Stokastik geometri modellerine göre baz istasyonu dağılımının ardından her katman için minimum erişilebilir veri oranı ve tüm ađ için minimum erişilebilir veri hacmi performans ölçütleri elde edilmiştir. Bu ölçütler ile ağın enerji ve alan spektral verimliliği ifadeleri formülize edilmiştir. PPP modeline göre gerçek ađ topolojisine daha yakın ve iyileştirilmiş baz istasyonu dağılımı ile ađ enerji ve alan spektral verimliliğinin kayda değer şekilde yükseltilebileceği Monte Carlo benzetimleri ile desteklenerek gösterilmiştir. Bununla birlikte HCPP ve PHP modelleri kullanılarak elde edilen yeni ađ topolojisinde, PPP modeli ile oluşturulan ađ modeline göre enerji ve alan spektral verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir.





# **BASE STATION DEPLOYMENT IN NEXT GENERATION ULTRA DENSE HETEROGENEOUS COMMUNICATION NETWORKS VIA STOCHASTIC GEOMETRY MODELS**

## **SUMMARY**

Studies on structure of 5G communication networks have been increased due to high data-rate network services and accelerating demand for access to everywhere. Ultra dense heterogeneous communication network structures resulting from the densification of base stations (BSs) is one of the main promising methods of 5G technology to meet the wireless network capacity demand. However, the overloaded distribution of BSs brings about some problems such as high power consumption and severe interference exposed by users.

In order to meet the extreme network energy consumption, BS deployment techniques are considered as appropriate solution methods in ultra dense heterogeneous communication networks. Therefore, many network planning strategies in this area draw attention. Optimal network planning is considered as a necessary challenge for multi-tier heterogeneous communication networks with different BS types. In addition, modeling of network geometry plays an important role in network deployment and analysis.

Irregular deployment of the BSs in heterogeneous networks (HetNet) renders widely-used hexagonal deployment model of limited utility. Grid models are highly idealized models which do not accurately capture the actual BS deployment. Therefore, stochastic geometry models have been commonly used for the deployment of BSs in the HetNet. Instead of hexagonal structure, Voronoi tessellation which is the stochastic geometry scheme model, is suitable for the irregular network topology and much closer to real network structure. The Voronoi tessellation helps by separating the network region into sub-regions (Voronoi cells), allowing them to study in areas such as spatial data processing and surface modeling.

The stochastic geometry also allows the examination of the average behavior on many spatial occurrences of a network where network nodes adapt to a given probability distribution. In this way, different types of wireless networks can be modeled, characterized and their behavior can be interpreted. One of these stochastic geometry models, independent Poisson Point Process (PPP), is widely used to model and analyze performance of networks. The PPP can be used easily during simulation and the performance metrics are obtained in a tractable way. However, the PPP which is the point process with zero interaction between nodes is not a practical solution for the BS distribution. Because, the BSs in real-life network structures are not independent between inter-tiers compared with BSs deployed according to PPP model. Also, the BSs are located very close to the each other when PPP model is applied to them. To overcome this drawback, in this study, Hard Core Point Process (HCPP) and Poisson Hole Process (PHP) models of stochastic geometry are used instead of PPP model in the two-tier heterogeneous communication networks, including macro base stations (MBS) and pico base stations (PBS).

To reduce interference among the MBSs and improve the PPP model, PPP-derived HCPP models are applied to MBSs. HCPP models are point process models where points are not allowed to be closer than a certain minimum distance. The distance is called hard-core distance that creates a repulsive effect among network nodes. The HCPP models, which are the types of Repulsive Point Processes (RPPs), provide more regular structures in comparison with PPP models. Three different HCPP models which are Matérn hardcore point process type I (MHCPP-I), Matérn hard-core point process type-II (MHCPP-II) and simple sequential inhibition (SSI) are applied to MBSs and corresponding all cases are compared.

The HCPP models provide the repulsive effect among BSs only in the same tier. There is no interdependence between tiers as in PPP model. Therefore, PBSs where placed in the second tier may be so close to MBSs and this situation results high interference exposed by MBSs.

To address this drawback, after the HCPP distributions of MBSs, the PBSs are deployed according to the PHP model to decrease the interference from the PBS to the MBSs and to adjust the inter-tier dependency. Unlike HCPP model, the PHP model puts a ban on nodes where placed different tiers, not to be closer than a specific distance. This specific distance is calculated according to traffic load in the network, signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) threshold, channel path loss factor and transmit power ratio of MBS to PBS. Also, owing to this deployment of PBSs, the gaps in the network topology are filled. Therefore, the network capacity and the coverage probability of PBSs can be increased.

After the deployment of BS according to the stochastic geometry models, channel and power consumption models are designed. Rayleigh channel fading is utilized as fast fading model. Interference models are formed for each of tiers to calculate SINR values. Both inter-tier and intra-tier interference are taken into consideration when forming the interference formulation.

Then, minimum achievable data rate for each tier and minimum achievable throughput in the whole heterogeneous communication network are obtained as performance metrics by using derived coverage probability formulation. With these metrics, network energy efficiency and area spectral efficiency expressions are formulated.

The generated system is tested with three different simulation scenarios. In the first scenario, both MBSs and PBSs are deployed according to PPP model. Also, the PPP model is applied to users. Then, with the help of performance metrics, effects of density of MBSs and PBSs on the energy efficiency and area spectral efficiency are examined. For the second scenario, three different HCPPs are implemented for MBSs while PBSs are distributed with respect to PHP model. Users are placed according to PPP model in the same way. Comparison of the first and the second scenario is analyzed as third scenario.

Compared to PPP, it has been shown that the stochastic geometry models (HCPP and PHP) used in this study are closer to the actual network topology and these models improve the deployment of the BS. Finally, the optimum values of BS density which maximize network energy efficiency have been obtained with the HCPP and PHP models. In addition, it is observed that the area spectral efficiency increases in proportion to the density of the BS. However, in the new network topology obtained using HCPP and PHP models, it is observed that results of energy efficiency and area

spectral efficiency are much higher in comparison with the network model created according to PPP.





# 1. GİRİŞ

## 1.1 Tezin Amacı

Yeni nesil telsiz ağların günümüzde varolan ağlara oranla daha fazla kapasite sağlaması beklenmektedir. Ağın mekansal olarak yoğunlaştırılması, ağ kapasitesinin artırılmasını sağlayan yöntemlerden birisidir. Bununla birlikte mekansal ağ yoğunlaşmasından ötürü, spektral kaynaklara sınırlandırma getirilmekte ve yüksek veri hacmi ihtiyacına karşılık yoğun enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Bu nedenle optimum ağ planlaması gelecek nesil aşırı yoğun heterojen haberleşme ağlarında önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmanın amacı, literatürdeki farklı ağ planlaması çalışmalarına karşılık stokastik geometri modelleri kullanılarak yeni bir ağ topolojisi modeli oluşturmak ve oluşturulan bu ağ planındaki baz istasyonu (BS) yoğunluğunun enerji tüketimine etkisini incelemektir. Oluşturulan ağ yerleşim modelleri ile BS yoğunluğunun alan spektral verimliliğe ve ağ enerjisi verimliliğine olan etkisinin araştırılmıştır.

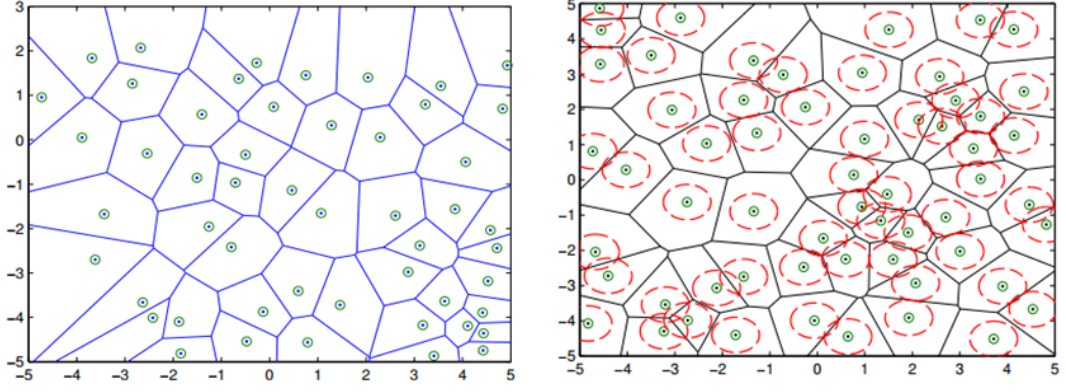
## 1.2 Literatür Araştırması

Yeni nesil aşırı yoğun heterojen haberleşme ağlarında artan enerji tüketimine karşılık enerji verimliliğine dair birçok çalışma sunulmuştur [1]-[4]. Piko hücre ve makro hücrelerden oluşan bir heterojen ağ (Heterogeneous Network, HetNet) için enerji tasarrufu algoritması geliştirilmiştir [1]. Enerji kaynağının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için piko hücrelerin düşük trafik yüküne sahip olduğu durumlarda, piko hücrelerin kapatılıp kullanıcılarının diğer aktif piko hücrelere ve makro hücrelere geçişini sağlayan bir enerji verimliliği planı sunulmuştur. [2]'de ise bir HetNet'te trafik yük dağılımındaki eşitsizliklerden yola çıkılarak enerji verimliliği optimizasyon problemi oluşturulmuştur. Probleme açgözlü algoritması ve değiştirilmiş eşleştirme algoritması kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında önerilen çalışmanın minimum trafik yükü ve trafik yükü eşitsizliğinin yüksek olduğu hizmet alanında çok sayıda

trafik talep noktaları olan senaryolar için uygun olduğu doğrulanmaktadır. [3]'teki çalışma, enerji verimli telsiz haberleşme ağları hakkındaki detaylı bir araştırmayı kapsamaktadır. 5G teknolojisine dair kaynak ve ağ planlaması çalışmalarını içeren makale ve konferans bildirilerinin katkıları gözden geçirilmiştir. Bütünsel bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu, ağdaki girişim ve ağ dağılımındaki rastgelelik ile başa çıkabilmenin gelecek araştırmaların konusu olabileceği düşünülmektedir. [4]'te enerji verimliliği için BS'lerde uyku modu teknikleri incelenmiştir. Uyku modu teknikleri donanımsal olarak değişiklik gerektirmediğinden düşük maliyet açısından diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Literatürdeki uyku modu tekniklerinin sistem ve güç modeli üzerinde varsayımları bulunarak tutarsızlıkları tartışılmıştır.

Son yıllarda ise HetNet'teki BS dağılımına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır [5]-[7]. [5]'te geliştirilen enerji verimli BS dağılımı, mikro BS'ler için aday konumların seçilmesi ve bu adaylar arasında optimum kümenin seçilmesi şeklinde iki adımda incelenmiştir. Aday yerlerinin optimum seçiminde ise ağgözlü algoritması kullanılmıştır. [6]'da ise BS'lerin rassal olarak dağıtıldığı makro ve piko katmanlardan oluşan bir HetNet'te kapsama olasılığından başarılı iletim olasılığı türetilmiştir. Her iki katman için paylaşılan spektrum işlemiyle kullanıcı başına ortalama veri hacmi elde edilmiştir. Ayrıca ağ enerji verimliliğini maksimuma çıkaran optimum yüke bağlı bir piko BS (PBS) aktivite faktörünün bulunabileceği gösterilmiştir. [7]'deki çalışmada iki katmanlı bir HetNet'te uygun bir odaklanma arama algoritması ile küçük baz istasyonu (small base station, SBS) sayısı, kapsama ve spektral verimlilik kısıtlamaları altındaki iletim gücünün bulunması amaçlanmıştır.

BS'lerin mekansal yerleşimi, HetNet performansını önemli ölçüde etkilemektedir. [8] ve [9]'da, BS topolojisi için altıgen grid yapıları kullanılmıştır, ancak bu dağıtım modeli oldukça düzgün ve gerçek dışıdır. Oluşturulan ağ şeması gerçek ağ modeline eşdeğer değildir ve sınırlı bir kullanıma sahiptir. Stokastik geometrinin, dağılım açısından esnek ve rastgele olan BS'ler için matematiksel bir araç olarak kullanılması ile gerçek yaşamdaki yerleşime daha yakın bir model oluşturur. Stokastik geometri sadece topolojik rastgelelik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çözümlenebilir analizlerin elde edilmesini de kolaylaştırır. Stokastik geometrinin en popüler modeli, performans analizi basitliği ve çözümlenebilirliği nedeniyle tercih edilen Poisson nokta sürecidir (Poisson Point Process, PPP) [10]. PPP dağılım modeli



**Şekil 1.1** : Kırsal alandaki gerçek baz istasyonu yerleşimi ve RPP modeline göre dağıtılan baz istasyonlarının yerleşimi.

kullanılan [11]'deki çalışmada, her katmandaki trafik yükü açısından elde edilebilecek minimum veri oranı karakterize edilmiştir. Sonrasında tüm HetNet'te elde edilebilecek minimum veri hacmi hesaplanmıştır ve son olarak BS dağılımına göre ağ enerji verimliliği analiz edilmiştir.

Bununla birlikte PPP modeli, BS'ler arasında itme kuvveti olan birçok ağ modeli için uygun değildir [12]. Ayrıca, BS'ler, girişimi azaltmak adına birbirlerine belirli bir mesafede yerleştirilmiştir. Bu nedenle, [12]-[14]'teki çalışmalarda itici nokta sürecinin (Repulsive Point Process, RPP) bir türü olan sabit çekirdekli nokta süreci (Hard-Core Point Process, HCPP) BS dağılım modelleri olarak kullanılmıştır. HCPP modeli, sürecin herhangi iki noktasının, önceden tanımlanmış bir sabit çekirdekli mesafeden daha az bir mesafede bir arada bulunamayacağı bir süreçtir. Şekil 1.1'de bir kırsal alandaki gerçek BS dağılımı ve bu gerçekliğe yakın RPP'ye göre yerleştirilmiş BS dağılımı görülmektedir [12]. [13]'teki çalışmada sabit çekirdekli nokta sürecinde temas mesafesinin en yakın komşuya olan toplam dağılım fonksiyonunu hesaplamak için analitik bir yaklaşım sunulmuştur. [14]'te ise Matérn sabit çekirdekli nokta sürecindeki en yakın nokta mesafesinin deneysel olasılık yoğunluk fonksiyonu çeşitli mevcut dağılımlara uydurulmuştur ve Weibull dağılımının incelenen diğer tüm dağılımlar arasında en iyi uyumluluğa sahip olduğu tespit edilmiştir. [12]'de BS yerleşimi için RPP uygulanarak hücresel ağlarda kapsama olasılığı analiz edilmiştir. Stokastik geometri modeli Matérn sabit çekirdekli nokta süreci kullanılarak yerleştirilen BS'ler arasında minimum mesafeyi sağlamak için süreçteki aşağı yönlü kapsama olasılığı elde edilmiştir. Modelin doğrulanması için Matérn sabit çekirdekli

nokta süreci ile elde edilen topolojinin kapsama olasılığı, halka açık bir veri tabanından elde edilen gerçek bir BS dağıtımıyla karşılaştırılmıştır.

Ayrıca, BS'lerin gerçek ağ tasarımında katmanlar arası bağımlılığı mevcuttur fakat PPP modeline göre dağıtılan BS'ler ise bağımsızdır. [15]'te Poisson delik süreci (Poisson Hole Process, PHP) modeli kullanılarak gerçek heterojen hücresel ağlardaki mekansal bağımlılığa benzer, gerçek BS dağılımına uygun PPP modelinden daha uygulanabilir bir model oluşturulmuştur ve gelecekteki telsiz ağların analizi ve tasarımında yararlı bilgiler verilmesi amaçlanmıştır. [16]'daki çalışmada, makro BS'ler (MBSs) için PPP modeli ve SBS'ler için ise PHP modeli dağılımlı iki katmanlı aşırı yüksek frekanslı (mmWave) bir HetNet'te kapsama performansının değerlendirilmesi yapılmıştır. [17]'de ise telsiz ağlardaki BS dağılımları için varyasyon katsayısı tabanlı üç farklı düzenlilik ölçütü geliştirilmiştir ve bu ölçütler HCPP modelleri üzerinde uygulanmıştır. Bu düzenlilik ölçütlerinden varyasyon katsayısı tabanlı Delaunay üçgenleme kenar uzunluğu ile BS dağılımının PPP yapısından altıgen grid yapısına doğru gidildikçe düzenliliğin arttığı ve HCPP modellerinin düzenliliğinin PPP ile altıgen grid yapısı arasında olduğu gösterilmiştir.

### 1.3 Katkı

Bu tez kapsamında elde edilen katkılar aşağıda listelenmiştir.

- [15]'teki gibi PHP ve [12] ile [17]'deki gibi HCPP modelleri kullanılarak düzenliliğin altıgen grid yapısı ve PPP arasında olan gerçek hayata daha yakın bir ağ yerleşim modeli ilk kez oluşturulmuştur.
- Altıgen grid şeması yerine Poisson Voronoi mozaiği (Poisson Voronoi Tessellation, PVT) üzerine dağıtılan MBS ve PBS'leri içeren iki katmanlı bir heterojen haberleşme ağındaki dağılım modelleri incelenmiştir. İtme etkisi sağlamak için, MBS'ler için üç ayrı HCPP stokastik geometri modeli uygulanmış ve MBS'lere katmanlar arası bağımlılık sağlamak için PBS'ler için PHP modeli kullanılmıştır. Böylelikle, PBS'ler MBS'lerin dışlanma bölgesinden izole edilmiş ve girişim azaltılmıştır. Ayrıca, PBS'ler tarafından boşlukları doldurularak ağ kapasitesi, dolayısıyla alan spektral verimlilik artırılmıştır.



- İlk olarak [11]'deki gibi MBS, PBS ve kullanıcılar için PPP modeli uygulanmıştır ve çalışmadaki gibi aynı şekilde performans ölçütleri türetilerek ağ enerji verimliliği elde edilmiştir. Çalışmaya ek olarak baz istasyonları yoğunluğunun alan spektral verimliliğine etkisi incelenmiştir. İkinci bir senaryo olarak her iki katmanda PPP modeli yerine, MBS için üç farklı HCPP modelleri ve PBS'ler için PHP modeli uygulanmıştır. Uygulanan stokastik geometri modelleri sonucunda kapsama olasılığı, kesinti olasılığı, minimum erişilebilir veri oranı ve minimum erişilebilir veri hacmi gibi ağ performans ölçütleri elde edilmiş ve ağdaki alan spektral verimlilik ile ağ enerji verimliliği hesaplanmıştır. Sonuç olarak iki senaryo karşılaştırılmıştır.
- HCPP ile elde edilen modeller ile yoğunluğa bağlı olarak PPP modeline göre daha yüksek enerji verimliliği elde edilmiştir.
- PPP modelinden türetilen HCPP ve PHP modelleri sonucunda sistemdeki PBS'lerin kapsama olasılıkları arttırılmıştır.

#### **1.4 Tez Organizasyonu**

Bu tezde Bölüm 2'de aşırı yoğun HetNet ve özellikleri anlatılırken, Bölüm 3'te kullanılan stokastik geometri modellerinin teorik açıklamasına yer verilmiştir. Bölüm 4'te ise MBS ve PBS'leri içeren iki katmanlı bir heterojen haberleşme ağı üzerinde sistem modeli oluşturulmuş ve performans ölçütleri türetilmiştir. Son olarak Bölüm 5'te ise benzetimler ile ağdaki BS'lerin yoğunluğunun kapalı formu elde edilen alan spektral verimliliği ve ağ enerji verimliliği üzerindeki etkisi incelenmiştir ve Bölüm 6'da çalışmanın sonuçlarına ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.



## **2. AŞIRI YOĞUN HETEROJEN AĞLAR**

HetNet, artan ağ trafiğini desteklemek için farklı tipteki BS'ler ve röleler gibi iletim düğümlerinin küçük bir coğrafi alanda kullanıldığı bir ağ yaklaşımıdır. SBS'lerin düzenli MBS'ler ile yerleştirilmesi literatürde ve standartlarda HetNet olarak geçmektedir. HetNet, homojen ağ yapısından farklı ve yeni bir yaklaşım getirmiştir.

### **2.1 Baz İstasyonu Çeşitleri**

Bu bölümde karasal haberleşme sistemlerinde kullanılan BS tipleri açıklanmıştır.

#### **2.1.1 Makro baz istasyonları (MBS)**

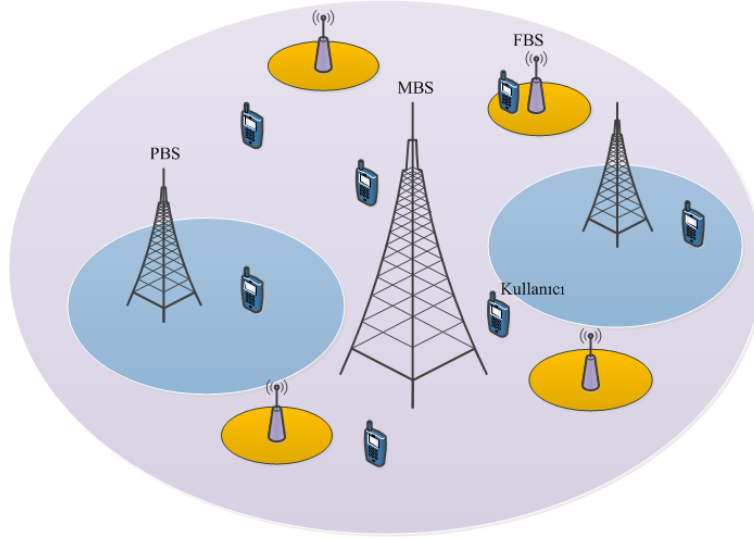
Genel erişime açık MBS'lerin kapsama alanı yarıçapları birkaç kilometredir ve yerleşim alanı olarak banliyö, şehir ve kırsal alan gibi dış mekanlarda konumlandırılmaktadır. Ayrıca, yönlü anten kullanımı ile bu mesafeyi arttırmak olasıdır. Ancak bina, ağaç, tepe gibi engellerin olduğu yerleşim yerlerinde oluşan kapsama alanı daha küçük olmak zorundadır. Maliyet bakımından pahalı olduğundan dolayı çok sık olarak yerleştirilmezler. İletim güçleri ise 46 dBm kadardır. MBS'ler trafik yoğunluğunun fazla olmadığı dar bant hizmetlerinin sunulduğu ortamlarda kullanılır [18].

#### **2.1.2 Küçük baz istasyonları (SBS)**

SBS'ler ise PBS ve femto BS (FBS) olarak incelenmiştir.

##### **2.1.2.1 Piko baz istasyonları (PBS)**

MBS'lere göre maliyeti daha ucuz olan PBS'lerin kapsama alanı yarıçapı 100 metreye kadardır ve kullanıcılar için genel erişime açıktır. Yerleşim olarak telsiz internet erişiminin olduğu bağlantı noktalarında hem iç hem de dış mekanlarda konumlandırılır. İletim güçleri 23-30 dBm arasındadır. MBS'lerin yükünü azaltmak adına onlarca aktif



**Şekil 2.1 :** HetNet modeli örneği

kullanıcıya hizmet verebilirler. Yüksek bant genişliğinde düşük gecikmeli bağlantılar sağlamak için veri aktarımı MBS'lerde olduğu gibi fiber ya da mikro dalga bağlantısı ile sağlanır [19].

### 2.1.2.2 Femto baz istasyonları (FBS)

Kullanıcı tarafından ev, ofis gibi iç mekanlarda konumlandırılan femto baz istasyonları (femto base stations, FBSs) daha az sayıda kullanıcıya hizmet verir. İletim gücü 23 dBm'den daha az olmakla birlikte maliyet olarak MBS ve PBS'lerden daha ucuzdur. Kapsama alanı en fazla 50 metredir. FBS'ler üç farklı erişim modunda çalışırlar: Açık, kapalı ve hibrid erişim. Açık erişim modunda belirli bir operatörün tüm kullanıcıları düğüme erişebilirken; kapalı erişim modunda erişim kapalı bir abone grubuyla (Closed Subscriber Group, CSG) sınırlandırılmıştır. Hibrid modunda ise tüm aboneler her zaman CSG abonelerine verilen öncelikle FBS'lere bağlanabilir [19]. Şekil 2.1'de bir HetNet örneği modeli verilmiştir. Aşırı yoğun ağlar ise, aktif kullanıcılardan daha fazla BS'lerin bulunduğu ağ yapısı olarak adlandırılırlar [20]. Başka bir deyişle düzensiz olarak konumlandırılmış iletim düğümleri yoğunluğunun ( $\lambda_b$ ) aktif kullanıcı yoğunluğundan ( $\lambda_u$ ) büyük olması halidir,  $\lambda_b > \lambda_u$ . Aşırı yoğun haberleşme ağının başka bir tanımı ise [21]'de kullanıcı yoğunluğundan bağımsız olarak sadece BS yoğunluğu olarak verilmiştir. Bir ağın aşırı yoğun olarak değerlendirilebileceği yoğunluğun  $\lambda_b > 103 \text{ BS}/\text{km}^2$  şeklinde niceliksel olarak gösterilmiştir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi aşırı yoğun ağlar HetNet'in başka bir evrimi olarak ifade edilebilir



**Şekil 2.2** : Geleneksel homojen ağlardan aşırı yoğun ağlara geçiş.

[19]. Aşırı yoğun ağlardaki sınırlı spektrum kaynakları ile hayati ve uzun vadeli bir çözüm olarak mevcut spektrumun birim alanı başına tekrar kullanımını artırması düşünülür. Spektrumun yeniden kullanımını iki önemli fayda sağlar: (a) Ağ kapasitesini önemli ölçüde yükseltir. (b) Son kullanıcıya olan bağlantı mesafesinin kısaltır ve bu sayede bağlantı kalitesini artırır.

PBS, FBS gibi esnek bir şekilde yerleştirilmiş düşük güçlü SBS'leri içeren aşırı yoğun ağların kullanılması kapasite ihtiyacını karşılamak adına 5G teknolojisinde umut vaadeden çözümlerden birisidir. Düşük maliyetli SBS'lerin aşırı yoğun ağlarda enerji verimliliği ve yük dengeleme açısından ağın performansını artırması beklenir. Aşırı yoğun ağlarda BS dağıtımının özü, sistemin performansını arttırmak için verici ve alıcı arasındaki fiziksel mesafeyi olabildiğince kısaltmaktır. Geleneksel ağlara kıyasla aşırı yoğun ağlar bazı avantajlara sahiptir [22]:

- SBS'ler kullanıcılar tarafından konumlandırılabilir ve bu dağıtım maliyetini önemli ölçüde azaltır.
- Aşırı yoğun ağlarda BS'ler esnek yerleşim özelliğine sahiptir. Akıllı dağılım teknikleri kullanılarak ya da belirli sayıdaki SBS'ler bekleme moduna alınarak girişim azaltılabilir ve enerji verimliliği arttırılabilir [23].
- Aşırı yoğun ağlarda kör nokta sorunu tamamen çözülebilir. Görüş hattı (Line-of-Sight, LOS) iletiminde yüksek olasılık elde edilmesini sağlar. BS'ler ve kullanıcılar arasındaki mesafe küçüldükçe, LOS iletiminin olasılığı artar [24].

Ağlarda aşırı yoğunlaştırma işlemi uzaysal olarak yatay ve dikey yoğunlaştırma şeklinde ikiye ayrılır. Yatay yoğunlaştırmada erişim düğümleri yatay düzlemde (sokaklar ya da telsiz internet erişiminin olduğu etkin noktalarda) yoğunlaştırılır. Dikey yoğunlaşma ise kullanıcıların BS'leri apartmanlarına, ofislerine, toplantı

odalarına ve bina içlerine yerleştirdiği yükseklik düzleminde gerçekleşmektedir [19]. Bu nedenle aşırı yoğun ağlar üzerinde çalışılırken iki yoğunlaşma şeması için farklı modelleme yapılması gerekebilir. Üstelik, dikey düzlemde ağ yoğunlaştırma performansı yatay düzlemde farklıdır. Dikey yoğunlaştırmada aynı alan için alan spektral verimliliği fazla katlı binalarda iyi sonuçlar verir.

Bununla birlikte, SBS'lerin aşırı yoğun bir şekilde konumlandırılmasında aşağıda tanımlanan zorluklar meydana gelmektedir [25]:

- En büyük engel merkez ağı yapılan veri aktarımındaki zorluktur. Operatörlerin her SBS için daima ideal, yüksek hızlı, düşük gecikmeli bir veri taşıma hizmet garantisi vermesi güçtür. Ayrıca SBS sayısı yüksek olduğu için, taşıyıcı ekipmanın maliyeti, dağıtım ve bakım maliyeti, aşırı yoğun ağların ticari uygulamasını mümkün kılacak kadar düşük olmalıdır.
- SBS'lerin birbirine yakınlığından dolayı komşu BS'ler arasında şiddetli girişim meydana gelmektedir. Bundan dolayı aşırı yoğun ağlarda girişim yönetimi planlamaları yapılmalıdır.
- Hareketlilik sorunu olarak aşırı yoğun ağlarda SBS'lerin küçük kapsama alanından dolayı mobil el değiştirme (handover) daha sık meydana gelmektedir.
- Aşırı yoğun ağlardaki yapılanma yüksek enerji tüketimine sebep olmaktadır. Yüksek enerji tüketimi sadece çevreye zarar vermekle kalmaz, bu durum aynı zamanda operatörlerin enerji faturalarına da yansımaktadır. Bu nedenle, çevreci haberleşme son yıllarda popüler bir araştırma konusu haline gelişmiştir.

### 3. STOKASTİK GEOMETRİ MODELLERİ

Konu olarak rassal uzay örüntülerini konu alan stokastik geometri, ağ düğümlerinin belirli bir olasılık dağılımına uyum sağladığı bir ağın bir çok mekansal gerçekleşmesi üzerindeki ortalama davranışların incelenmesine olanak sağlar. Bu sayede farklı türdeki telsiz ağlar modellenilebilir, karakterize edilebilir ve davranışları anlamlandırılabilir. Telsiz iletim düğümlerinin yerleri ve kanal üzerinde belirsizlikleri bulunan büyük ölçekli ağlarda stokastik geometri, ağ davranışını incelemek ve ağ performansına katkı sağlamak için basit ve çözümlenebilir bir yaklaşım sunar.

#### 3.1 Poisson Voronoi Mozaiği

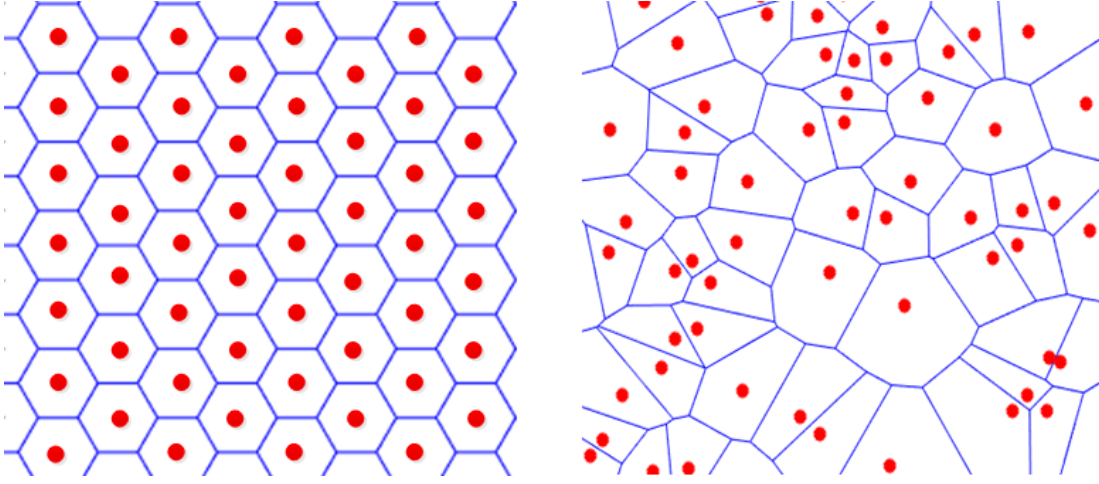
Telsiz ağ yapılarında geleneksel altıgen ağ şeması birçok çalışmada kullanılsa da pratikte BS'ler özdeş bir şekilde dağılım göstermemektedir. Bu nedenle son çalışmalarda stokastik geometri dağılımları göz önüne alınarak ağ şeması olarak Şekil 3.1'deki gibi Poisson Voronoi mozaiği kullanılmaktadır. Stokastik geometrinin önemli hesaplama araçlarından biri olan Voronoi mozaikleme, çalışılan alanı alt bölgelere (Voronoi hücrelere) ayırarak mekansal veri işleme ve yüzey modelleme gibi alanlarda çalışma imkanı sağlar. Poisson Voronoi mozaikleme, Voronoi diyagramında Poisson dağılımına göre  $\lambda$  yoğunluklu BS'lerin konumlandırılması ile oluşturulan yapıdır ve bir Voronoi hücrenin büyüklüğü  $S$  ile belirtilirse, olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir [26]:

$$f(S) = \lambda^k \frac{K^k}{\Gamma(K)} S^{(k-1)} \exp(-\lambda^k K S). \quad (3.1)$$

Denklemden geçen  $\Gamma(K) = \int_0^\infty x^{k-1} \exp(-x) dx$  Gamma fonksiyonunu belirtir ve  $K$  faktörü  $K = 3.575$  [27] olarak alınır.

#### 3.2 Poisson Nokta Süreci

Stokastik geometri analizinde BS'lerin ve kullanıcıların mekansal konumları nokta süreci (Point Process, PP) ile modellenmektedir. Poisson nokta süreci (Poisson Point



**Şekil 3.1** : Altıgen grid yapısı ve Poisson Voronoi mozaiği

Process, PPP), bağımsızlık ve çözümlenebilirlik özelliği nedeniyle yaygın olarak tercih edilen bir süreçtir. Bu yaklaşımla, kapsama olasılığı ve erişilebilir veri oran gibi performans ölçütleri, potansiyel topolojik gerçekleştirmelerinin ortalaması alınarak hücresel ağlardan analitik olarak türetilir. Böylece, ağ sisteminin tasarımı, enerji ve alan spektral verimliliğinin araştırılması gibi optimizasyon çalışmaları için uygun hale gelir. Nokta süreci, çoklu olasılıkla sayılabilecek birçok noktadan oluşan rastgele bir grup olarak adlandırılırken, Poisson nokta süreci ise,  $\lambda$  yoğunluk parametrelili Poisson dağılımına sahip bir kümedeki nokta sayısıdır.

PPP modeli daha matematiksel olarak şu şekilde açıklanabilir:  $\Phi = \{x_{(i)} : i = 1, 2, \dots\} \subset \mathbb{R}^d$  ile ifade edilen bir PP, ancak ve ancak herhangi bir  $B \subset \mathbb{R}^d$  tıkkız kümesindeki noktaların sayısının bir Poisson rassal değişkeni olması ile Poisson nokta süreci olarak adlandırılır ve birbirinden ayrık ve bağımsız kümeler içindeki bu noktaların sayısı aşağıdaki gibi ifade edilen Poisson dağılımına sahiptir:

$$P\{B \text{ kümesinde } k \text{ adet nokta}\} = P\{\Phi(B) = k\} = \frac{\Lambda^k}{k!} \exp(-\Lambda) \quad (3.2)$$

Denklemden  $\lambda(x)$  yoğunluğu için Poisson rassal değişkeninin yoğunluk ölçüsü  $\Lambda = \int_B \lambda(x) dx$  olarak ifade edilir. Eğer  $\lambda(x)$ , sabit bir değer ise ( $\lambda(x) = \lambda$ ), bu Poisson nokta süreci homojen Poisson nokta süreci (Homogeneous Poisson Point Process, HPPP) olarak tanımlanır. Yoğunluk ölçüsü aynı zamanda  $B$  kümesindeki noktaların sayısının beklenen değeridir

$$\Lambda(B) \stackrel{\text{def}}{=} E[N(B)], \forall B \in \mathbb{R}^d. \quad (3.3)$$



Her  $B$  kompakt kümesi için  $N(B)$ , ortalama değeri  $\lambda|B|$  olan bir Poisson dağılıma sahiptir ve  $|\cdot|$ ,  $B$  kümesinin Lebesgue ölçüsüdür. Böylelikle (3.2) denklemini aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P\{\Phi(B) = k\} = \frac{(\lambda|B|)^k}{k!} \exp(-\lambda|B|). \quad (3.4)$$

Bir ağ topolojisinde kullanıcı ile BS arasındaki uzaklık  $r$  ile gösterilir ve BS, PPP modeline göre homojen dağılım gösteriyorsa  $r$ 'nin pdf fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

Poisson modeline göre dağılan kullanıcıların yarıçapı  $R$  olan BS'nin kapsama alanından dışarı kalması olasılığı,  $P[r > R]$ :

$$P(\lambda, k = 0) = \frac{(\lambda \pi R^2)^k}{k!} \exp(-\lambda \pi R^2) = \exp(-\lambda \pi R^2). \quad (3.5)$$

$P[r \leq R]$ 'nin kümülatif dağılım fonksiyonu:

$$F_r(R) = 1 - \exp(-\lambda \pi R^2) \quad (3.6)$$

olarak elde edilir. (3.6) denkleminin olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki gibi bulunur:

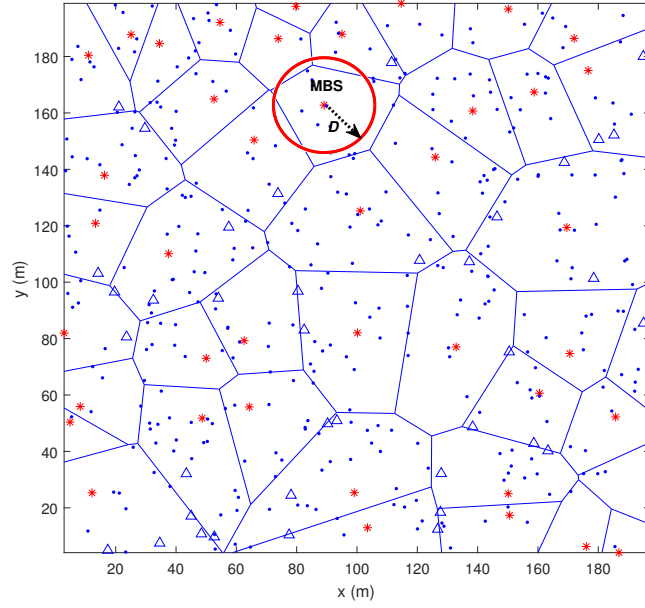
$$f_r(r) = \frac{F_r(r)}{dr} = 2\lambda \pi r \exp(-\lambda \pi r^2). \quad (3.7)$$

### 3.3 Poisson Boşluk Süreci

$(\Phi_m, \lambda_m)$  parametreleri ile tanımlanan bir PPP ve yoğunluğu  $\lambda_p > \lambda_m$  olan  $\Phi_p$  başka bir PPP olsun. Her  $x \in \phi_m$  için,  $x$  merkezli ve  $D$  yarıçaplı bir çember olan  $b(x, D)$ 'nin  $\phi_p \cap b(x, D)$  olduğu tüm  $\phi_p$  noktaları kaldırılır. Geriye kalan  $\phi_p$  noktaları ise Poisson hole sürecini ( $\phi_{php}$ ) oluşturur ve yoğunluğu aşağıdaki gibi elde edilir

$$\lambda_{php} = \lambda_p \cdot \exp(-\lambda_m \pi D^2). \quad (3.8)$$

Şekil 3.2'de ise MBS ve PBS'lerden oluşan iki katmanlı bir heterojen ağda Poisson boşluk süreci ile dağılımı yapılan ağ topolojisi görülmektedir.



Şekil 3.2 : İki- katmanlı heterojen ağda Poisson boşluk süreci örneği

### 3.4 Sabit Çekirdekli Nokta Süreci

Bu sürece göre herhangi bir düğümün, sabit çekirdekli mesafesi olarak adlandırılan belirli bir minimum mesafeden daha yakın olması yasaktır. BS'ler arasındaki bu sabit çekirdekli mesafesini korumak için, ilk olarak herhangi bir kısıtlama olmadan bir PPP modeli uygulanır, daha sonra sabit çekirdekli durumunu ihlal eden düğümler kaldırılır. HCPP'ler bu yoğunluk azaltma işleminin koşullarına göre sınıflandırılır [17], [28].

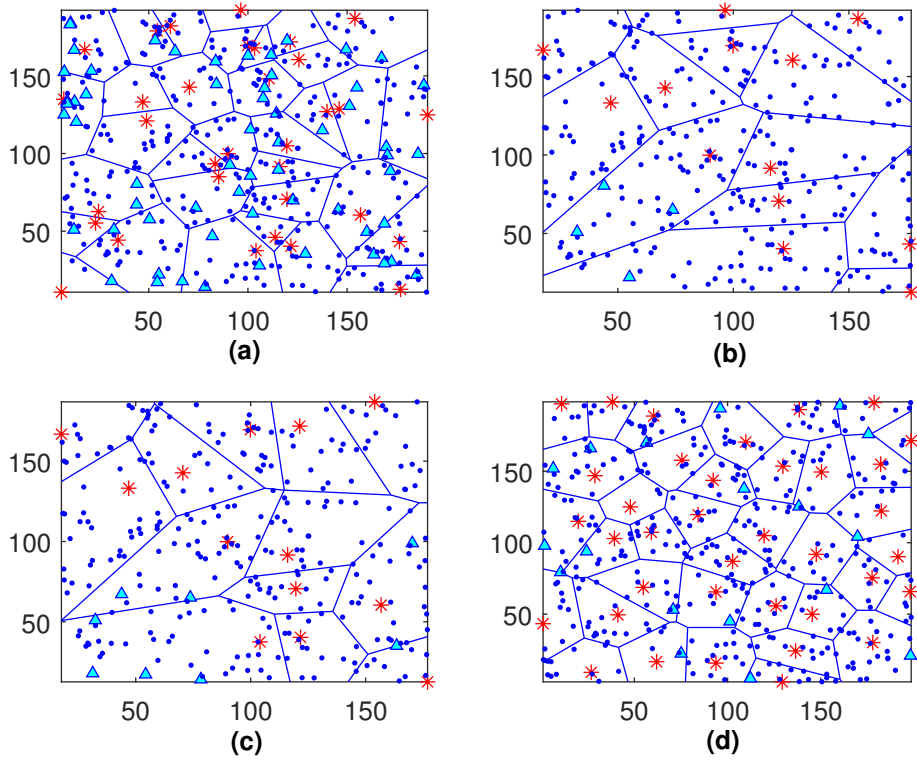
#### 3.4.1 Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip - I

$(\Phi_m, \lambda_m)$  parametrelili bir PPP'den birbirine  $r_h$  mesafesinden daha yakın olan düğümlerin aynı anda kaldırılması ile elde edilen bu süreç MHCPP-I,  $(\Phi_{h-core})$  olarak adlandırılır ve yeni yoğunluğu aşağıdaki gibi olur [28]

$$\lambda_{h-core} = \lambda_m \cdot \exp(-\lambda_m \pi r_h^2). \quad (3.9)$$

#### 3.4.2 Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip - II

$(\Phi_m, \lambda_m)$  parametrelili bir PPP'de her bir nokta,  $[0,1]$  aralığında bağımsız bir rassal düzgün değişken olan  $U_i$  işaretleri ile eşleştirilir. Daha sonra  $r_h$  mesafesi komşuluğundaki daha yüksek işarete sahip olan noktalar aynı anda kaldırılır. Oluşan bu süreç MHCPP-II  $(\phi_{h-core})$  olarak ifade edilir ve yoğunluğu aşağıdaki gibi elde



**Şekil 3.3** : İki-katmanlı HetNet'te (a) PPP, (b) MHCPP - I, (c) MHCPP - II, (d) SSI dağılımlarının Poisson Voronoi mozaiği üzerinde gösterimi.

edilir [28]

$$\lambda_{h-core} = \frac{1 - \exp^{-\lambda_m \pi r_h^2}}{\pi r_h^2}. \quad (3.10)$$

### 3.4.3 Basit sıralı engelleme süreci

Gerekli baz istasyonu yoğunluğu  $\lambda_m$  olarak verilen bir alanda aday noktalar sırası ile PPP ( $\phi_m$ )'ye göre üretilir. Kabul edilen herhangi bir noktanın  $r_h$  mesafesi komşuluğunda yeni bir nokta üretildiğinde, o nokta silinir. Süreç, nokta eklenmesi imkansız hale geldiğinde ya da belirli bir yoğunluğa ulaşıldığında durur [12], [28]. Bu yeni süreç ise Basit Sıralı Engelleme (Simple Sequential Inhibition, SSI,  $\phi_{h-core}$ ) olarak tanımlanır ve ulaşılabilecek iyi-uyumlu yoğunluk aşağıdaki gibidir

$$\lambda_{h-core} = \lambda_m \cdot \min\{1, 0.61 \cdot (r_h \sqrt{\lambda_m})^{-1.79}\}. \quad (3.11)$$

Şekil 3.3'te PPP ve PPP'den türetilen MHCPP - I, MHCPP - II ve SSI dağılım modelleri iki-katmanlı HetNet yapısı üzerinde gösterilmiştir. Sırasıyla kırmızı yıldızlar MBS'leri, mavi üçgenler PBS'leri ve mavi noktalar kullanıcıları temsil etmektedir. Ayrıca [17]'deki çalışmaya benzer şekilde başta PPP modeli ile yerleşimi yapılan

HetNet yapısının (a)'dan (d)'ye doğru HCPP dağılımları ile daha düzenli bir şema yapısı haline geldiği, altıgen grid yapısı ile PPP modeli arasında bir düzenliliğe sahip olduğu görülmektedir.



## 4. AŞIRI HETEROJEN AĞLARDA STOKASTİK GEOMETRİ ANALİZİ

Bölüm 2 ve Bölüm 3'te HetNet ve stokastik geometri modelleri ile ilgili teorik bilgi verilmiştir. Bu bölümde ise çalışılan sistem modeli oluşturulduktan sonra performans ölçütleri türetilerek elde edilmektedir.

### 4.1 Sistem Modeli

Oluşturulan sistem modeli, ağ modeli ile kanal ve güç tüketimi modeli başlıkları altında incelenmiştir.

#### 4.1.1 Ağ modeli

Ağ modeli olarak MBS, PBS ve kullanıcıları içeren aşağı yönlü aşırı yoğun iki katmanlı heterojen bir haberleşme ağı üzerinde çalışılmıştır. Stokastik geometri model olarak MBS, PBS ve kullanıcılar başta  $\Phi_m$ ,  $\Phi_p$  and  $\Phi_u$  ile belirtilen PPP modeline göre yerleştirilmiştir ve yoğunlukları ise  $\lambda_m$ ,  $\lambda_p$  ve  $\lambda_u$  olmuştur.

Sonrasında üç farklı HCPP (Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip-1, Matérn sabit çekirdekli nokta süreci tip-2 ve basit sıralı engelleme süreci) MBS'ler için uygulanmıştır. Bu süreçler  $\Phi_{h-core}$  ile ifade edilmiştir ve yoğunlukları ise  $\lambda_{h-core}$ 'dur. Oluşan her bir farklı MBS dağılımı için PBS'ler PPP modelinin ardından  $\phi_{php} \subset \phi_p$  olacak şekilde Poisson boşluk süreci ( $\Phi_{php}$ ) ile tekrar dağıtılmıştır ve oluşan yeni yoğunluğu  $\lambda_{php}$  ile gösterilmiştir.

PHP modeli uygulanırken her bir MBS'in çevresinde  $D$  yarıçaplı bir dışlanım bölgesi oluşturulur. PBS'ler MBS'lerin belli bir mesafe uzağında olduğu bu dışlanım bölgesi dışında kalarak hem girişim etkisinin azaltılmasına katkı sağlar hem de kapsama boşluklarını doldurup ağ kapasitesinin artmasında yardımcı olur.

Sistemdeki katman sayısı  $k = \{1, 2, \dots\}$  ile ifade edilecek olunursa MBS ve PBS'lerin yoğunluğunun kullanıcı yoğunluğuna oran faktörleri sırasıyla  $\rho_1 = \lambda_{h-core}/\lambda_u$  ve  $\rho_2 = \lambda_{php}/\lambda_u$  ile gösterilir. Kullanıcılar ise ilgili katmanındaki en yakın BS'e bağlanırlar

ve buna göre kendileri etiketlenmiş kullanıcı ve bağlı olduğu BS ise etiketlenmiş BS adını alır. Seçilen etiketlenmiş MBS kullanıcısı ile bağlı olduğu etiketlenmiş MBS arasındaki mesafe  $r_1$ , etiketlenmiş PBS kullanıcısı ile bağlı olduğu etiketlenmiş PBS arasındaki mesafe  $r_2$ 'dir.  $r_1$  ve  $r_2$  uzaklıklarının  $\phi_{h-core}$  ve  $\phi_{php}$ 'nin en yakın komşu mesafesi ortalamasına göre daha küçük ve orantılı olduğu kabul edilir. Bir PPP  $\phi$ 'nin en yakın komşu uzaklığının dağılımı (3.7) denkleminde elde edilir ve en yakın komşu uzaklığının ortalaması  $1/(2\sqrt{\lambda})$  olarak bulunur. Bu çalışmada  $r_1$  ve  $r_2$ ,  $r_1 = 1/(6\sqrt{\lambda_{h-core}})$  ve  $r_2 = 1/(6\sqrt{\lambda_{php}})$  olarak seçilmiştir [29].

Şekil 3.2'de iki katmanlı HetNet örneği ile belirtilen dairesel bir alan içinde etiketlenmiş MBS'nin dışlanım bölgesi gösterilmektedir. Bu dışlanım bölgesinin yarıçapı,  $D$ , aşağıdaki gibi elde edilir:

$$D = \frac{b \cdot r_1 [\gamma_1 (\frac{P_{i,2}}{P_{i,1}})]^{1/\alpha}}{E[N_1]}. \quad (4.1)$$

(4.1) denkleminde  $P_{i,1}$  ve  $P_{i,2}$  sırasıyla MBS ve PBS'lerin iletim gücünü göstermektedir.  $b$  tasarım katsayısı ve  $\gamma_1$  MBS'lerin SIR eşik değeridir.  $E[N_1]$  ise MBS'ye bağlanan ortalama kullanıcı sayısı yani MBS'nin trafik yükünü ifade eder. Trafik yükü arttıkça dışlanım bölgesi küçülür ve daha fazla PBS hizmet vermeye başlar. Trafik yükü azaldığında ise PBS'ler uyku moduna geçerek enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlar.

#### 4.1.2 Kanal ve güç tüketim modeli

Etiketlenmiş kullanıcı ve BS'lerin etkilendiği hızlı sönmüleme modeli olarak Rayleigh kanal sönmülenmesi ( $h \sim (0, 1)$ ) kullanılmıştır ve bulunduğu katmana göre kanal kazancı  $h_k$  ile ifade edilmiştir. Yol kaybı faktörü ise  $\alpha > 2$  olacak şekilde seçilmiştir.

Modelde evrensel frekans tekrar kullanımı mevcut olduğundan ötürü, etiketlenmiş kullanıcının hizmet aldığı BS dışındaki HetNet'teki diğer tüm BS'ler potansiyel girişim kaynağı olarak düşünülür. Her bir katman için ayrı girişim değeri ( $I_k$ ) hesaplanır. MBS kullanıcısı hem servis aldığı MBS dışındaki tüm MBS'lerden ( $I_{m,m}$ ) hem de bulunduğu katman dışındaki tüm PBS'lerden gelen girişime ( $I_{m,p}$ ) maruz kalmaktadır. Etiketlenmiş MBS kullanıcısının etkisinde kaldığı toplam girişim  $I_m =$

$I_{m,m} + I_{m,p}$  olmak üzere  $I_{m,m}$  ve  $I_{m,p}$  aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_{m,m} = \sum_{i \in \phi_{h-core}/b_{m,0}} P_{t,1} R_{m,i}^{-\alpha} g_{m,i}, \quad (4.2a)$$

$$I_{m,p} = \sum_{i \in \phi_{php}} P_{t,2} R_{p,i}^{-\alpha} g_{p,i}. \quad (4.2b)$$

Denklemlerdeki  $R$ , ilgili katmandaki etiketlenmiş kullanıcı ile girişime maruz kaldığı BS arasındaki mesafe iken  $g$  ilgili kanal kazancı katsayısıdır.

Aynı şekilde PBS kullanıcısı hem servis aldığı PBS dışındaki tüm PBS'lerden ( $I_{p,p}$ ) hem de bulunduğu katman dışındaki tüm MBS'lerden gelen girişime ( $I_{p,m}$ ) maruz kalmaktadır. Etiketlenmiş PBS kullanıcısının etkisinde kaldığı toplam girişim  $I_p = I_{p,p} + I_{p,m}$  olmak üzere  $I_{p,p}$  ve  $I_{p,m}$  aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_{p,p} = \sum_{i \in \phi_{php}/b_{p,0}} P_{t,2} R_{p,i}^{-\alpha} g_{p,i}, \quad (4.3a)$$

$$I_{p,m} = \sum_{i \in \phi_{h-core}} P_{t,1} R_{m,i}^{-\alpha} g_{m,i}. \quad (4.3b)$$

Denklemlerdeki  $b_{m,0}$  ve  $b_{p,0}$ , sırasıyla etiketlenmiş MBS ve PBS'lerdir.

$r_k$ , etiketlenmiş kullanıcı ve etiketlenmiş BS arasındaki mesafeyi ve  $\sigma_k^2$  ilgili katmandaki gürültü gücünü göstermek üzere, kullanıcıların bağlı olduğu ilgili BS'den aldığı işaret gücü  $P_{t,k} h_k r_k^{-\alpha}$  ile ifade edildiğinde, kullanıcının işaret-girişim-gürültü oranı (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_{t,k} h_k r_k^{-\alpha}}{I_k + \sigma_k^2}. \quad (4.4)$$

SINR, bir iletişim sisteminde ulaşılabilecek güvenilirliği ve maksimum verimi belirleyen bir ölçüttür. Daha yüksek SINR, işaretin gürültü ve girişim seviyelerine göre daha güçlü olduğu anlamına gelir; bu, daha iyi performans, daha yüksek veri hızı demektir. Ayrıca SINR, düğümlerin konumlarından ve kullanılan yol kaybı faktöründen etkilenir. [11]'ye göre hücre içi girişimin makul bir yoğunlukta gürültü gücüne baskın olduğu ispatlandığından dolayı, bu çalışmada gürültü gücü ihmal edilerek SINR yerine işaret-girişim oranı (signal-to-interference ratio, SIR) değerleri hesaplanmıştır.

Bununla birlikte, HetNet'teki etiketlenmiş BS'lerin; işaret işleme, batarya yedekleme, vb. sebeplerden dolayı tüketilen statik güç tüketimi ( $P_{c,k}$ ) ve iletim gücü tüketimi ( $P_{t,k}$ ) olmak üzere toplam güç tüketimi,  $P_k$ , [30] :

$$P_k = P_{c,k} + \zeta_k P_{t,k} \quad (4.5)$$

olarak gösterilir.  $\zeta_k$  ise  $k$ . katmandaki trafik yüküne bağlı güç tüketim katsayısıdır.

## 4.2 Ağ Performans Ölçütleri

BS dağılımına göre ağ enerji ve alan spektral verimliliğinin eldesi için sırasıyla her bir katmandaki minimum erişilebilir veri oranı ve tüm HetNet'teki minimum erişilebilir veri hacmi hesaplanır.

### 4.2.1 Kapsama ve kesinti olasılığı

Kabul edilebilir bir servis kalitesi için seçilen kullanıcı, bağlanacağı BS'nin kapsama alanı içinde olmalıdır. Diğer bir ifade ile kullanıcının ilgili katmandaki BS'ye bağlanırken belirli bir SIR eşiğine ( $\gamma_k$ ) ulaşması gerekir. Etiketlenmiş kullanıcının bu hedef SIR eşiğinden büyük bir SIR değerine erişebilme olasılığına kapsama olasılığı denir ve tanımı aşağıdaki gibidir [31]:

$$\begin{aligned} P_{cov}(\gamma_k) &= P(SIR_k > \gamma_k) \\ &= \frac{\pi}{C(\alpha)} \frac{\eta_k}{\sum_{k=1}^K \beta_k}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Formüldeki  $C(\alpha)$ ,  $\beta_k$  ve  $\eta_k$  ise aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$C(\alpha) = \frac{2\pi^2}{\alpha} \csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right), \quad (4.7a)$$

$$\beta_k = \rho_k P_{tk}^{2/\alpha}, \quad (4.7b)$$

$$\eta_k = \beta_k \gamma_k^{-2/\alpha}. \quad (4.7c)$$

Başka bir deyişle, bağlantı kalitesi başarılı bir bağlantıya geçmek için yeterince iyi olması durumudur. Kapsama olasılığı, başarı olasılığı olarak da adlandırılır.

Diğer yandan, kesinti olasılığı  $P_{out}(\gamma_k)$ , kullanıcının SIR'nin minimum bir eşiğin altına düşme olasılığıdır. Başarılı bir bağlantı için hizmet veren BS'e bağlantının



SIR'si yeterli değilse, belirli bir kullanıcı kesinti olarak kabul edilir ve kesinti olasılığı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P_{out}(\gamma_k) = 1 - P_{cov}(\gamma_k) \quad (4.8)$$

Kapsama olasılığı ve kesinti olasılığı kullanıcı ve hizmet veren BS arasındaki bağlantının kalitesini belirler.

#### 4.2.2 Minimum erişilebilir veri oranı

Hedeflenmiş SIR eşiği şartına dayanarak erişilen hedef veri oranına minimum erişilebilir veri oranı denir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$R_k = \frac{W}{E[N_k]} \log_2(1 + \gamma_k). \quad (4.9)$$

(4.9) denklemindeki  $N_k$ , ilgili katmanda BS'ye bağlı olan kullanıcı sayısıdır ve  $W$ , sistem bant genişliğini ifade etmektedir. Etiketlenmiş BS tarafından servis sağlanan ortalama kullanıcı sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır [32]:

$$E[N_k] = 1 + 1.28 \frac{p_k}{\rho_k}. \quad (4.10)$$

(4.10) denklemindeki  $p_k$ , etiketlenmiş kullanıcının  $k$ . katmandaki bir BS'ye bağlanma olasılığıdır [31]:

$$p_k = \frac{\eta_k}{\sum_{k=1}^K \eta_k}. \quad (4.11)$$

#### 4.2.3 Minimum erişilebilir veri hacmi

Tüm HetNet'teki minimum erişilebilir veri hacmi ise (4.6), (4.9) ve (4.11) denklemlerinden faydalanılarak ilgili katmandaki kapsama olasılığına, kullanıcı yoğunluğuna, etiketlenmiş kullanıcının ilgili katmandaki BS'ye bağlanma olasılığına ve minimum erişilebilir veri hacmine bağlı olarak elde edilir:

$$R_{total} = \sum_{k=1}^K P_{cov}(\gamma_k) \lambda_u p_k R_k. \quad (4.12)$$

#### 4.2.4 Alan spektral verimliliği

Ağ performansı analizi için önemli bir ölçü olan tüm HetNet'teki toplam alan spektral verimliliği aşağıdaki gibi ilgili katmandaki BS yoğunluğuna, kapsama olasılığına, ve SIR eşik değerine bağlı olarak hesaplanır [33], [34]:

$$\eta_{ASE} = \sum_{k=1}^K \lambda_k P_{cov}(\gamma_k) \log_2(1 + \gamma_k). \quad (4.13)$$

#### 4.2.5 Ağ enerji verimliliği

Ağ enerji verimliliği ise minimum erişilebilir veri hacminin toplam güç tüketimine oranından hesaplanır:

$$\eta_{EE} = \frac{R_{total}}{\sum_{k=1}^K \lambda_k P_k}. \quad (4.14)$$

(4.5) denkleminde verilen güç tüketim denklemindeki  $\zeta_k$  katsayısı [11]'a göre  $k$ . katmandaki BS trafik yükü ile doğru orantılı olduğundan  $\zeta_k = E[N_k]$  olarak kabul edilir ve ağ enerji verimliliği daha açık bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{EE} = \frac{\frac{W\pi}{C(\alpha)} \sum_{k=1}^K \frac{\rho_k \eta_k^2 \log_2(1+\gamma_k)}{(\sum_{k=1}^K \beta_k)(\rho_k \sum_{k=1}^K \eta_k + 1.28 \eta_k)}}{\sum_{k=1}^K \rho_k \left( P_{ck} + P_{tk} + 1.28 \frac{P_{tk} \eta_k}{\rho_k \sum_{k=1}^K \eta_k} \right)}. \quad (4.15)$$

Görüldüğü üzere ağ enerji verimliliği ifadesi BS'lerin kullanıcı yoğunluğuna bağlı olarak ifade edilmiştir. Bundan dolayı benzetim kısmında BS'lerin kullanıcı yoğunluğuna oranı üzerinden analiz yapılmıştır.

## 5. BENZETİM ANALİZİ VE SONUÇLARI

Bu bölümde stokastik modeller yardımıyla dağılımı yapılan BS yoğunluklarının ağ enerji verimliliği ve alan spektral verimliliğine olan etkisi incelenmiştir.

### 5.1 PPP Modeline Dayalı Benzetim Sonuçları

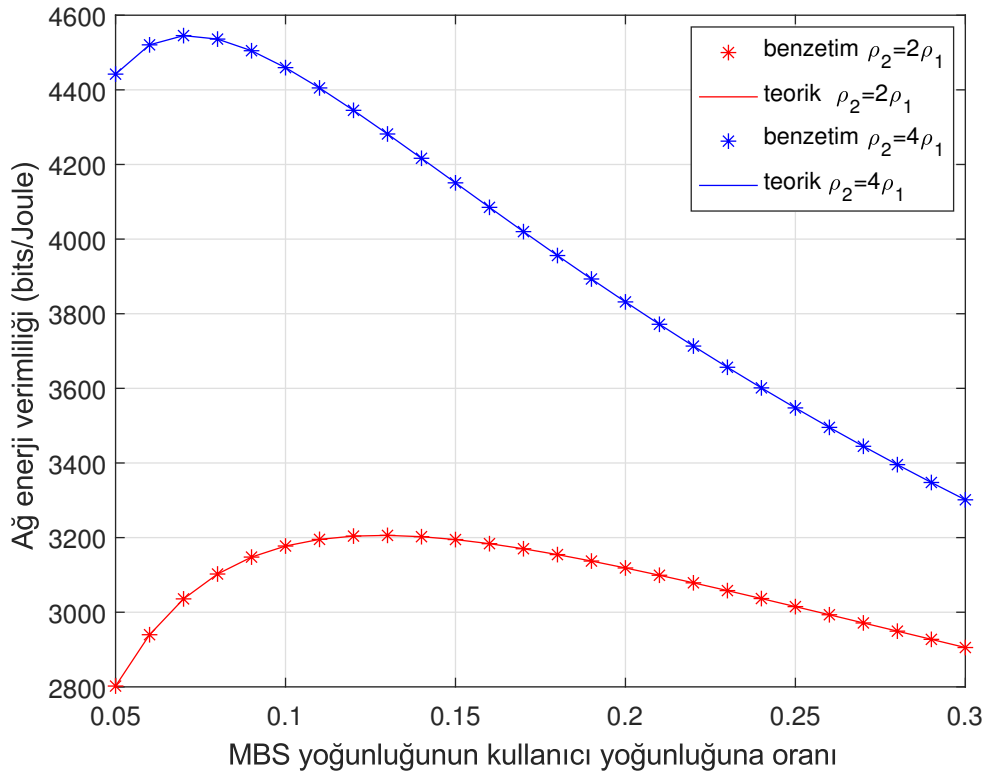
Benzetimde kullanılan parametreler ve değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. MBS, PBS ve kullanıcılar için sadece PPP stokastik geometri modeli uygulanmıştır.

**Çizelge 5.1** : PPP benzetiminde kullanılan parametreler.

Parametreler	Değerler
Sistem bant genişliği (W)	10 MHz
Frekans tekrar kullanım faktörü	1
Yol kaybı katsayısı ( $\alpha$ )	4
MBS statik güç tüketimi ( $P_{c,1}$ )	1000 W
PBS statik güç tüketimi ( $P_{c,2}$ )	50 W
MBS iletim gücü tüketimi ( $P_{t,1}$ )	46 dBm
PBS iletim gücü tüketimi ( $P_{t,2}$ )	30 dBm
SIR eşik değerleri ( $\gamma_1, \gamma_2$ )	$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$
HetNet kapsama alanı	$200km \times 200km$
Kullanıcı yoğunluğu	$0.005m^{-2}$

MBS yoğunluğunun kullanıcı yoğunluğuna oran faktörünün ( $\rho_1$ ), ağ enerji verimliliğine etkisi Şekil 5.1’de gösterilmektedir.  $\rho_2 = 2\rho_1$  durumunda  $\rho_1 = 0.13$  değeri için  $y = 3206$  ve  $\rho_2 = 4\rho_1$  durumunda  $\rho_1 = 0.07$  değeri için  $y = 4545$  maksimum ağ enerji verimlilikleri elde edilmiştir. Şekil 5.2’de ise  $\rho_2/\rho_1$ ’e göre meydana gelen ağ enerji verimliliği değişimi verilmiştir.  $\rho_1 = 0.1$  olduğu durumdaki ağ enerji verimliliğinin  $\rho_1 = 0.2$ ’deki verimlilikten daha yüksek olduğu görülmektedir. Sebebi ise ikinci durumdaki PBS yoğunluğunun daha fazla olması ile tüketilen güç miktarının aynı oranda daha fazla olmasıdır.

SIR eşik değeri  $\gamma$ ’nın ağ enerji verimliliğine etkisi Şekil 5.3’te ve alan spektral verimliliğe etkisi ise Şekil 5.6’te verilmiştir. Hem ağ enerji verimliliği hem de

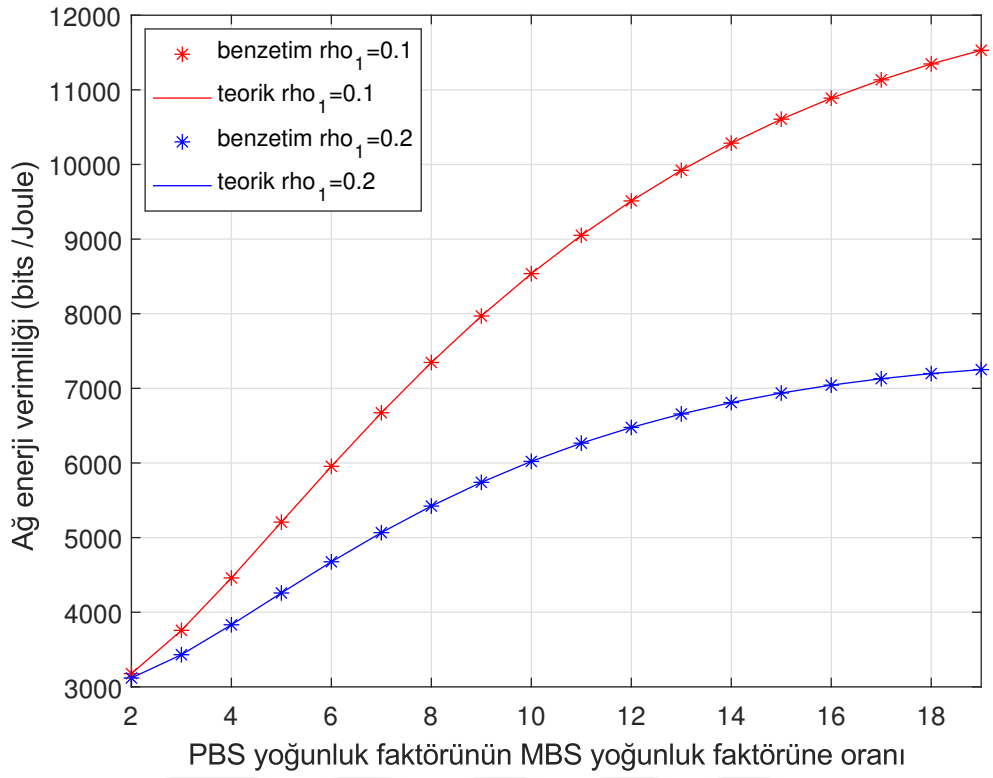


**Şekil 5.1** : PPP modelinde  $\rho_1$  'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\gamma=0$  dB.

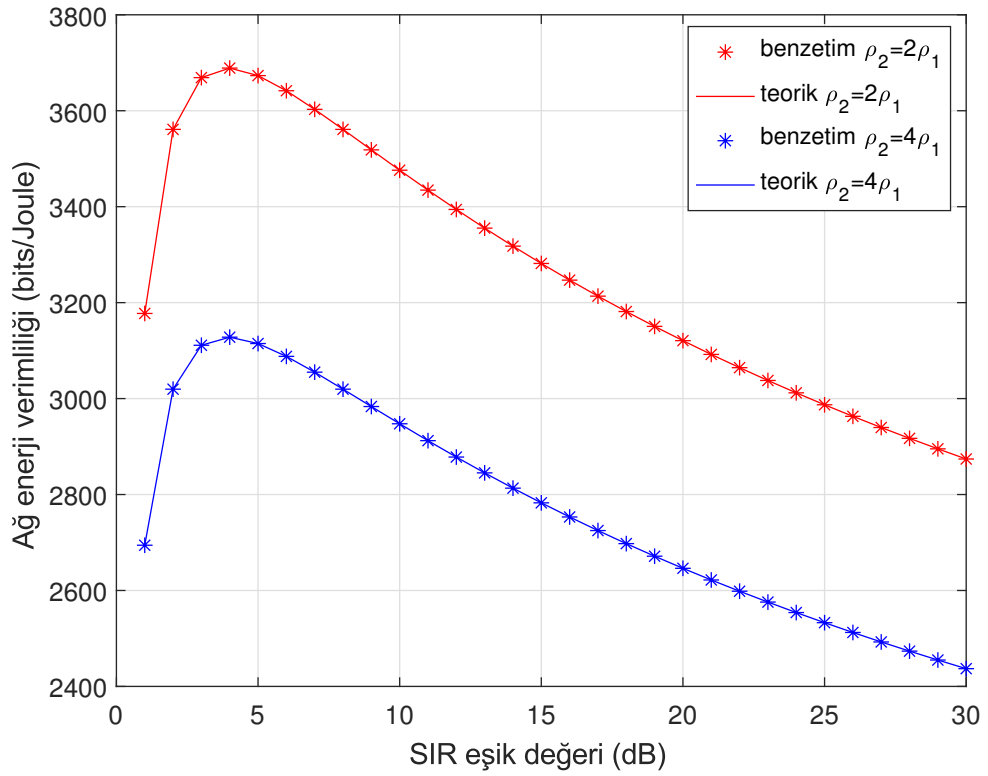
alan spektral verimlilik  $\gamma = 4$  dB değerine kadar orantılı olarak artmaktadır, fakat sonrasında düşüş gözlemlenmektedir. Sebebi ise SIR eşik değeri arttıkça kapsama olasılığının azalmasıdır. Bununla birlikte  $\rho_1 = 0.2$  deki verimliliklerin  $\rho_1 = 0.1$ 'deki durumdan daha yüksek olması daha yoğun MBS'lerde kapsama alanının artması ile ilgilidir. MBS yoğunluğunun kullanıcı yoğunluğuna oran faktörünün ( $\rho_1$ ) alan spektral verimliliğine etkisi Şekil 5.4'te görülmektedir. Artan  $\rho_1$  ile orantılı olarak alan spektral verimliliğin de arttığı gözlemlenmektedir. Ayrıca PBS'lerin daha yoğun olduğu  $\rho_2 = 4\rho_1$  durumunda alan spektral verimliliğin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 5.5'te ise  $\rho_2/\rho_1$  değeri arttıkça alan spektral verimlilikte artmaktadır.  $\rho_1 = 0.2$  olduğu durumda PBS yoğunluğu daha yüksek olduğu için,  $\rho_1 = 0.2$ 'deki alan spektral verimlilik  $\rho_1 = 0.1$ 'dekinden daha yüksek olacaktır.

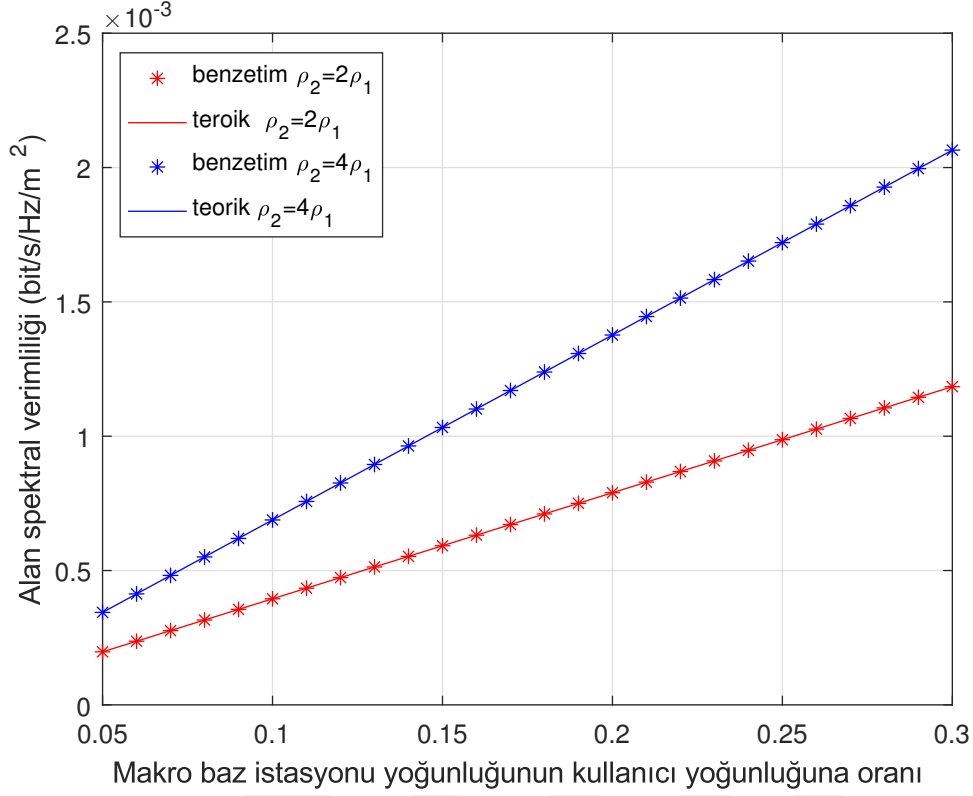
SIR eşik değerine göre değişen MBS ve PBS'lerin kapsama olasılıkları Şekil 5.7'de verilmektedir. MBS'lerin iletim gücü, PBS'lere göre daha yüksek olduğundan, kapsama olasılığı da aynı şekilde daha yüksek olur. SIR değeri arttıkça kullanıcıların baz istasyonlarına bağlanabilmeleri zorlaşacağından her iki baz istasyonu türü için kapsama olasılığı düşüş göstermektedir.



Şekil 5.2 : PPP modelinde  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\gamma=0$  dB.



Şekil 5.3 : PPP modelinde  $\gamma$ 'ya göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_1=0.1$ .



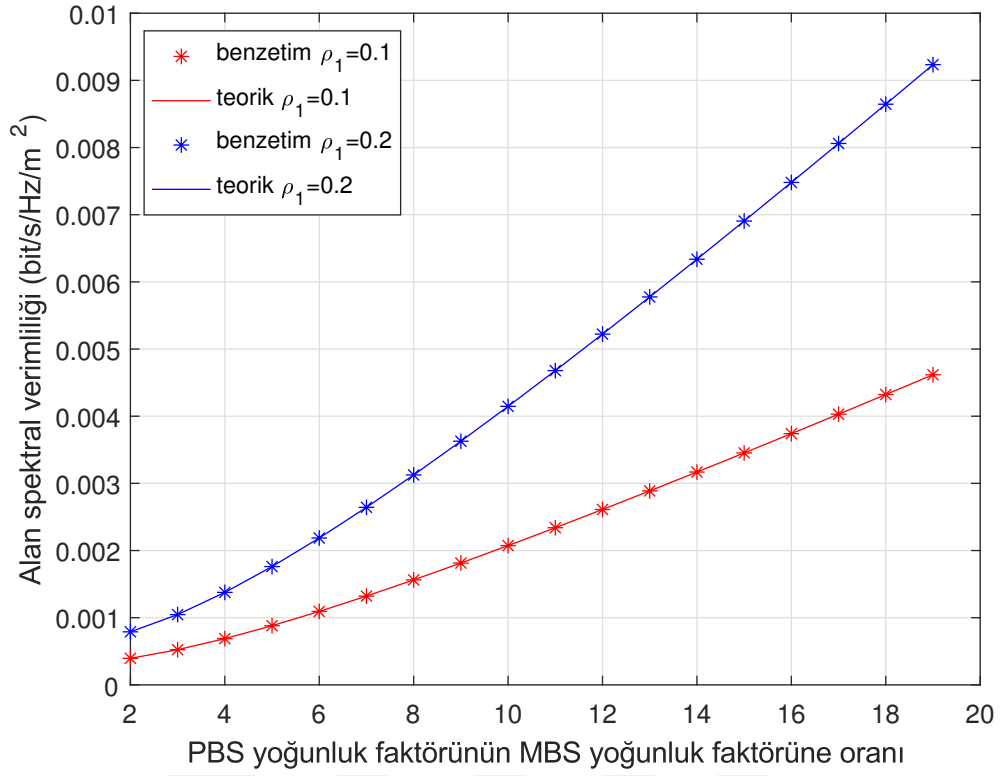
**Şekil 5.4** : PPP modelinde  $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\gamma=0$  dB.

Şekil 5.8'de ise SIR eşik değerine göre değişen MBS ve PBS'lerin kesinti olasılıkları gösterilmiştir. PBS'lerin iletim gücü, MBS'lere göre daha düşük olduğundan, kesinti olasılıkları ters orantılı olarak daha yüksek olur.

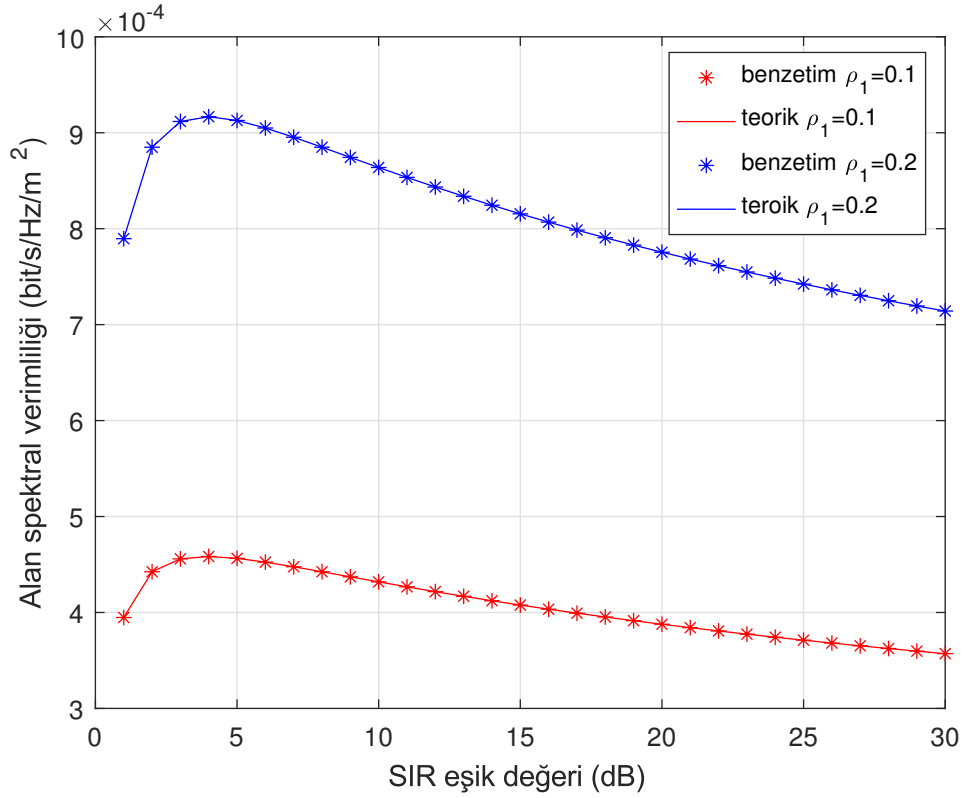
SIR eşik değerine göre orantılı olarak değişmekte olan MBS ve PBS'lerin minimum erişilebilir veri oranları Şekil 5.9'da verilmektedir. PBS'lerin yoğunluk oranı, MBS'lerden daha yüksek olduğu için minimum erişilebilir veri oranının da MBS'lere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

## 5.2 HCPP Modeline Dayalı Benzetim Sonuçları

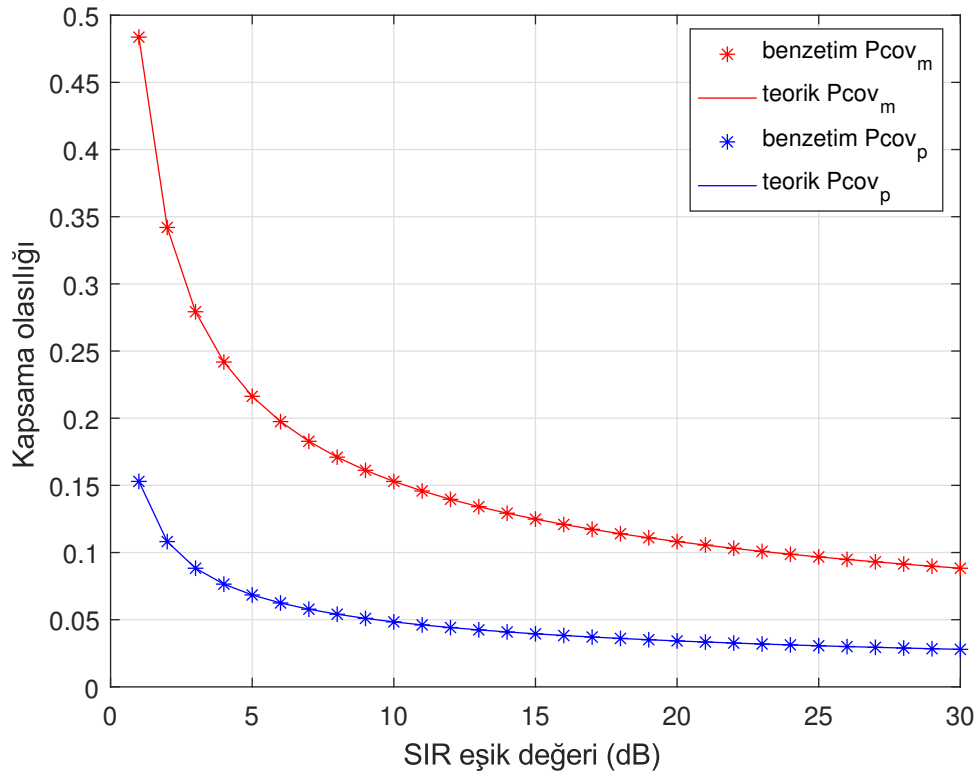
Benzetimde MBS'ler, PBS'ler ve kullanıcılar sırasıyla HCPP (MHCPP – I, MHCPP – II ve SSI), PHP ve PPP modelleri kullanılarak yerleşimi yapılmıştır ve yoğunlukları ise  $\lambda_{h-core}$ ,  $\lambda_{php}$  ve  $\lambda_u = 0.005$ 'dir. MBS'lere üç farklı HCPP uygulandığından dolayı benzetim üç farklı senaryo olarak çalışılmıştır.  $200 \times 200 \text{ km}^2$  alanlı iki katmanlı HetNet'teki bant genişliği 10 MHz olarak alınmıştır ve frekans tekrar kullanım faktörü ise 1 olarak seçilmiştir. Hızlı sönmüleme kanal modeli olarak  $h \sim (0, 1)$  olan Rayleigh kanal modeli uygulanmıştır ve yol kaybı katsayısı olan  $\alpha = 4$  olarak seçilmiştir. MBS



Şekil 5.5 : PPP modelinde  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\gamma=0$  dB.



Şekil 5.6 : PPP modelinde  $\gamma$ 'ya göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_1=0.1$ .

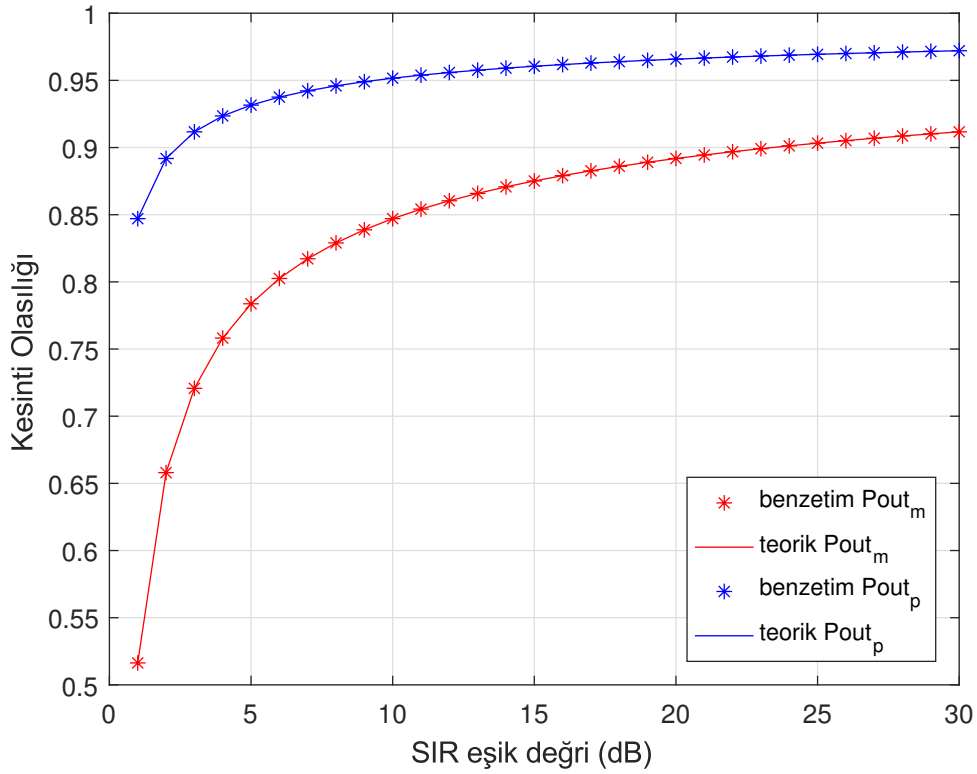


**Şekil 5.7** : PPP modelinde  $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin kapsama olasılığı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .

ve PBS'lerin statik güç tüketimleri ise sırasıyla  $P_{c,1} = 1000W$  ve  $P_{c,2} = 50W$  olarak alınmıştır. MBS iletim gücü  $P_{t,1} = 46dBm$  ve PBS iletim gücü  $P_{t,2} = 30dBm$ 'dir. SIR eşik değerleri ise her iki katman için de aynıdır ( $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ ). Dışlanım bölgesinin tasarım katsayısı  $b = 10$  ve sabit çekirdekli mesafe  $r_h = 35km$  olarak alınmıştır. Ayrıca baz istasyonlarının yerleşim benzetimi için 1000 denemeli Monte Carlo metodu uygulanmıştır.

MBS yoğunluğunun kullanıcı yoğunluğuna oran faktörünün ( $\rho_1$ ) alan spektral verimliliğe ve ağ enerji verimliliğine etkisi Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de görülmektedir. Şekil 5.10'da artan  $\rho_1$  ile orantılı olarak alan spektral verimliliğin de arttığı gözlemlenmektedir. PBS yoğunluğu MBS yoğunluğundan daha büyük olduğu için ( $\rho_2 = 2\rho_1$ ) (4.13) denklemindeki alan spektral verimliliğindeki etkisi MBS yoğunluğuna göre daha baskın olacaktır. Dolayısıyla MHCPP-I modelindeki PBS'lerin kapsama olasılığı diğer iki modele göre Şekil 5.14'te görüldüğü gibi daha yüksek olduğundan alan spektral verimliliği de daha yüksek olacaktır. Şekil 5.11'de ise  $\rho_1 = 0.31$  olduğu durumda MHCPP - I modeli için optimum bir değer elde



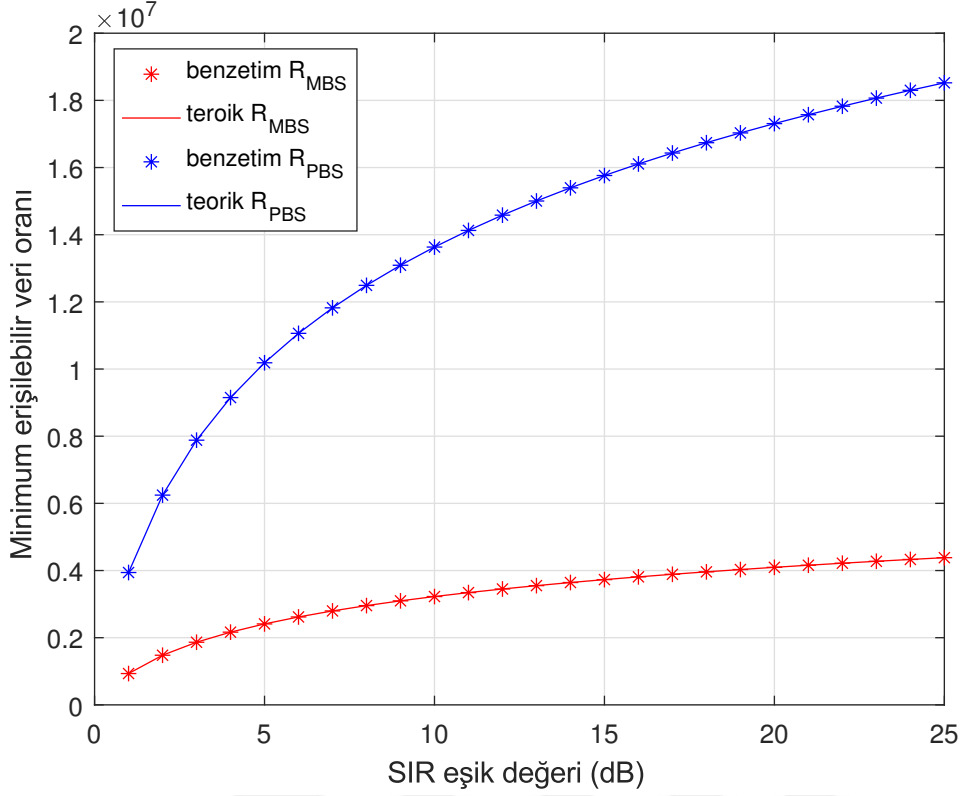


**Şekil 5.8** : PPP modelinde  $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin kesinti olasılığı.  
 $\rho_2/\rho_1=2$ .

edilir. Aynı  $\rho_1$  değeri için MHCPP - II ve SSI modelleri kullanılarak ağ enerji verimlilikleri sırasıyla  $1.14 \times 10^4$  bits/Joule ve  $0.5 \times 10^4$  bits/Joule olarak elde edilmiştir. MBS'ler için kullanılan süreçlerde enerji verimliliği bakımından en iyi sonuçları veren HCPP sıralaması MCHPP-I, MHCPP-II ve SSI şeklindedir. MHCPP-I modelinde diğerlerine göre daha fazla BS kaldırma işlemi olduğundan yoğunluk daha az olacaktır. Dolayısıyla güç tüketimi de daha az olacağından ters orantılı olarak üç model arasından en iyi enerji verimliliği sonucunu vermiştir.

SIR eşik değeri  $\gamma$ 'nın ağ enerji verimliliğine etkisi Şekil 5.12'de ve alan spektral verimliliğe etkisi ise Şekil 5.13'te verilmiştir. Hem ağ enerji verimliliği hem de alan spektral verimlilik  $\gamma = 4.05dB$  değeri için orantılı olarak artmaktadır, fakat sonrasında düşüş gözlemlenmektedir. Sebebi ise SIR eşik değeri arttıkça kapsama olasılığının azalmasıdır.

Şekil 5.14'te ise HetNet'teki kapsama olasılığının SIR eşik değeri  $\gamma$  ile ters orantılı olduğu görülmektedir.  $\gamma$  değeri arttıkça kullanıcıların servis alacakları BS'lere bağlanmaları zorlaşacaktır. Ayrıca MBS'lerin iletim güçlerinin PBS'lere göre yüksek



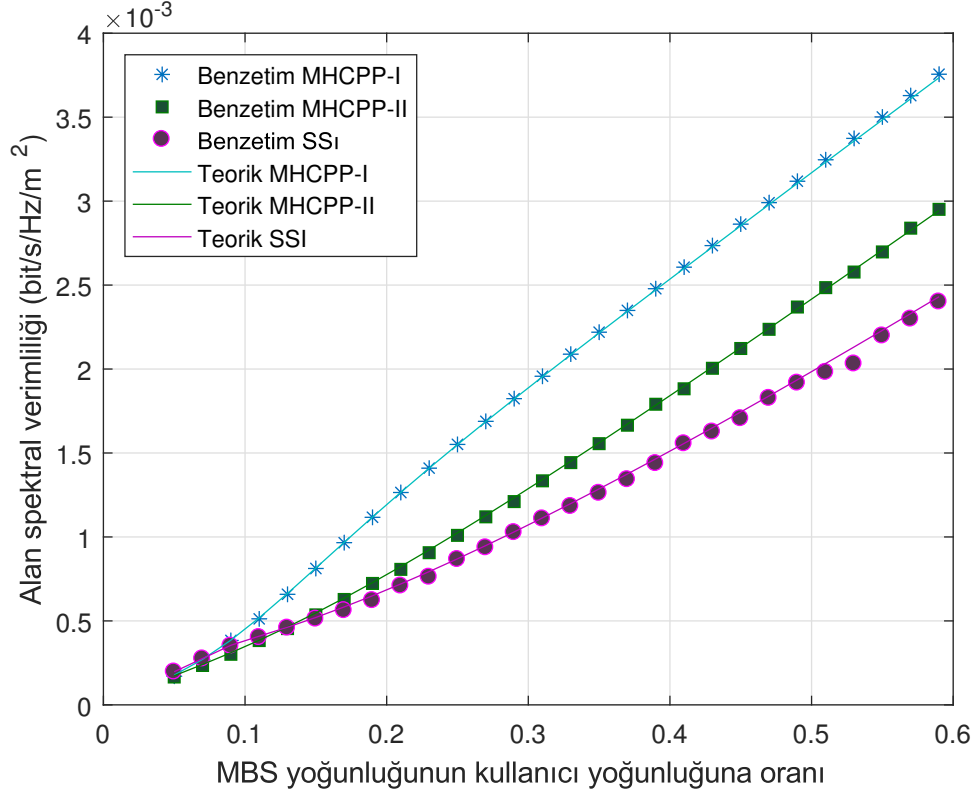
**Şekil 5.9** : PPP modelinde  $\gamma$ 'ya göre değişen MBS ve PBS'lerin minimum erişilebilir veri oranı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .

olmasından ötürü kapsama olasılıkları da PBS'lere göre aynı şekilde daha yüksektir. SSI modelinde Şekil 3.3'te görüleceği üzere MBS'lerde diğer süreçlere oranla daha az silme işlemi yapılmıştır. Dolayısıyla, MBS yoğunluğu daha fazla olduğundan kapsama olasılığı da daha yüksek sonuç vermiştir.

SIR eşik değeri  $\gamma$ 'nın HetNet'teki kesinti olasılığına etkisi ise Şekil 5.15'te görülmektedir.  $\gamma$  değeri arttıkça kullanıcılar ilgili katmanlardaki servis alacakları BS'lere bağlanmada sorun yaşayacaktır ve bu nedenle kesinti olasılıkları artacaktır.

Şekil 5.16'da ve Şekil 5.17'de sırasıyla  $\rho_2/\rho_1$  yoğunluk oran faktörünün artmasıyla ağ enerji verimliliği ve alan spektral verimliliğinin de arttığı gösterilmektedir. Her iki şekilde de MHCPP - I modeli en iyi sonucu vermektedir.

SIR eşik değerinin minimum erişilebilir veri oranına etkisi ise Şekil 5.18'de gösterilmektedir. PBS'lerin veri oranının MBS'lere göre daha yüksek olduğu ve HCPP'lerden en iyi sonucu SSI modelinin verdiği gözlemlenmiştir. Formülizasyonu gereği çok fazla BS silinmediği için daha yoğun BS'lerin olduğu ağda (4.10)



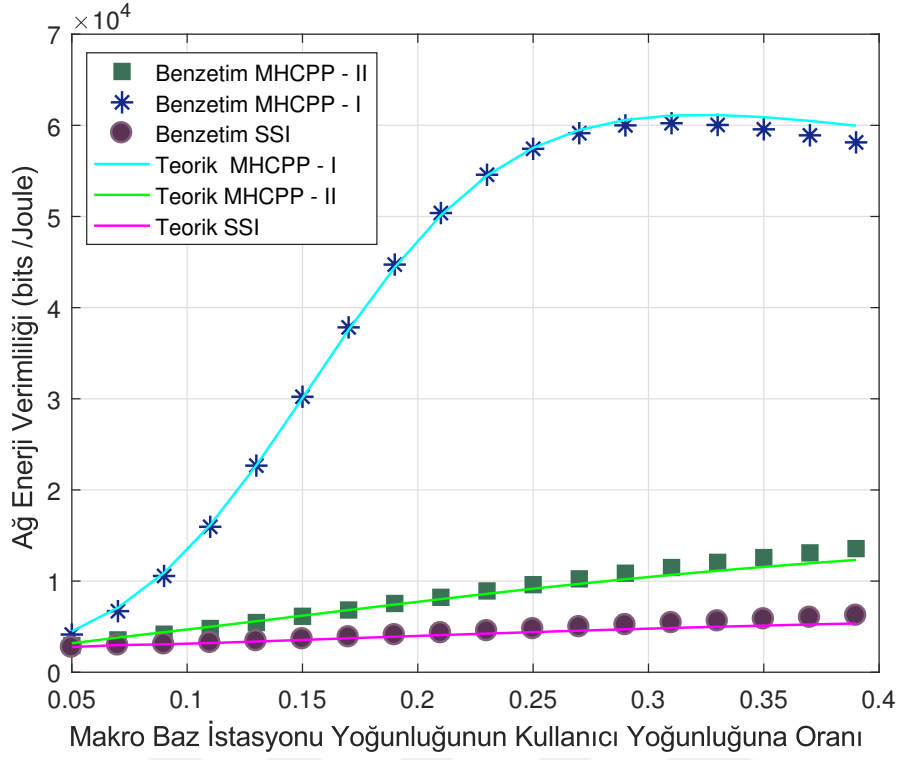
**Şekil 5.10** : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ .  $\gamma=0$  dB.

denklemindeki servis sağlanan ortalama kullanıcı sayısı daha yüksek olur ve (4.9) denkleminde SSI modelinin diğer iki modele oranla daha yüksek veri oranı elde edilebileceği görülmektedir.

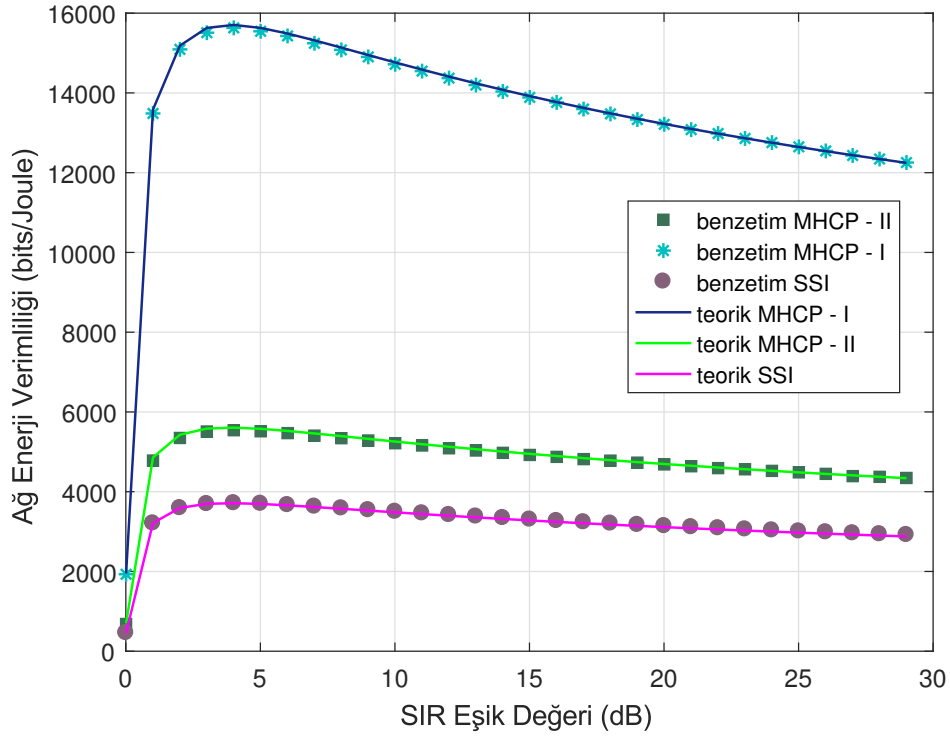
### 5.3 HCPP ve PPP Modellerine Dayalı Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırması

Bu bölümde ilk iki senaryoda benzetimi yapılan PPP ve HCPP-PHP modellerinin karşılaştırması yapılmıştır. Kullanılan parametre değerleri önceki senaryodakiler ile aynıdır.

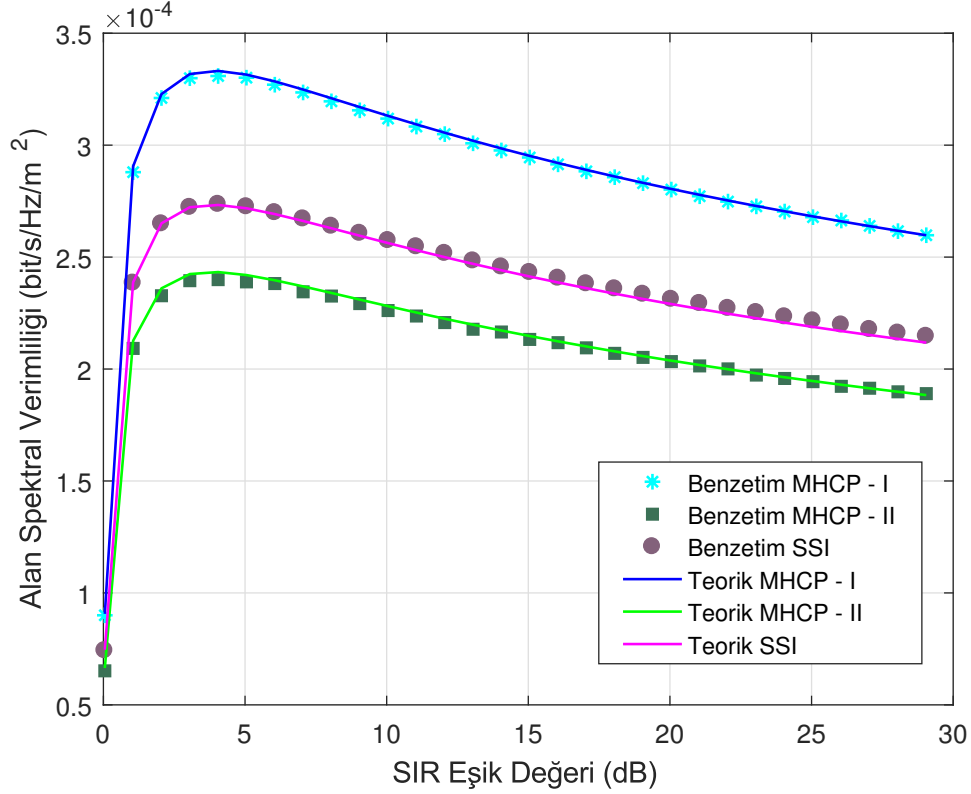
Şekil 5.19'da  $\rho_1$ 'e göre, Şekil 5.20'de  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre, Şekil 5.21'de ise  $\gamma$  SIR eşik değerine göre değişmekte olan ağ enerji verimliliği grafikleri verilmiştir. Her üç grafikte de HCPP modellerinin PPP modeline göre daha iyi sonuç verdiği ve HCPP modellerinden MHCPP-I modelinin en uygun model olduğu görülmektedir. Sebebi ise MHCPP-I süreci sonucunda baz istasyonu yoğunluğu diğer tüm süreçlere göre daha azdır. PPP modelinde herhangi bir baz istasyonu kaldırma işlemi olmadığından dolayı en yüksek yoğunluk PPP modelindedir. Dolayısıyla PPP modelindeki güç tüketimi



Şekil 5.11 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ .  $\gamma=0$  dB.



Şekil 5.12 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\gamma$ 'ya göre değişen Ağ Enerji Verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=5$

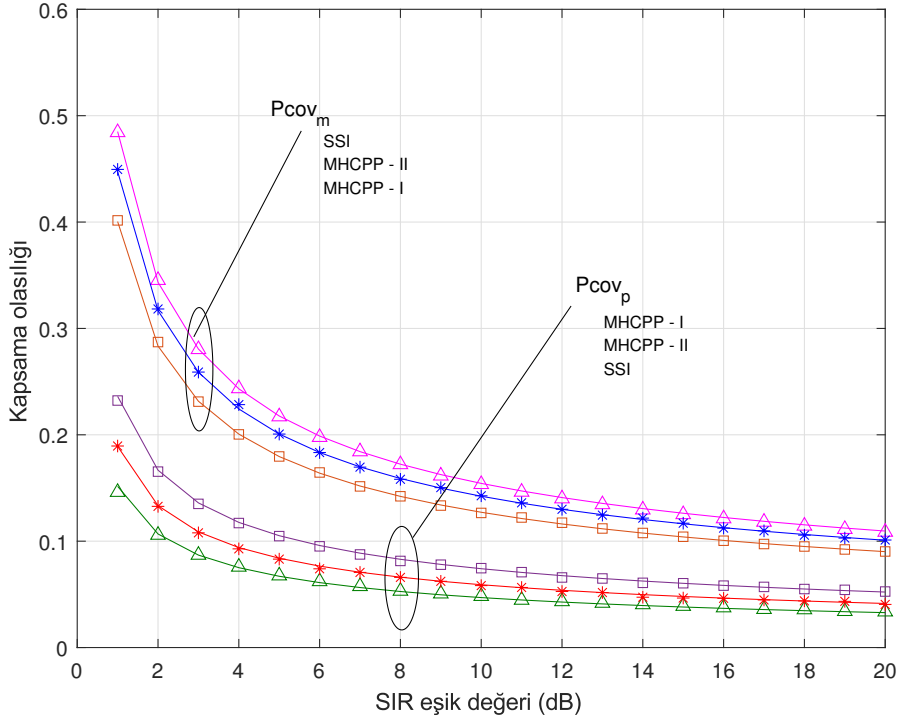


**Şekil 5.13** : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\gamma$ 'ya göre değişen Alan Spektral Verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=5$

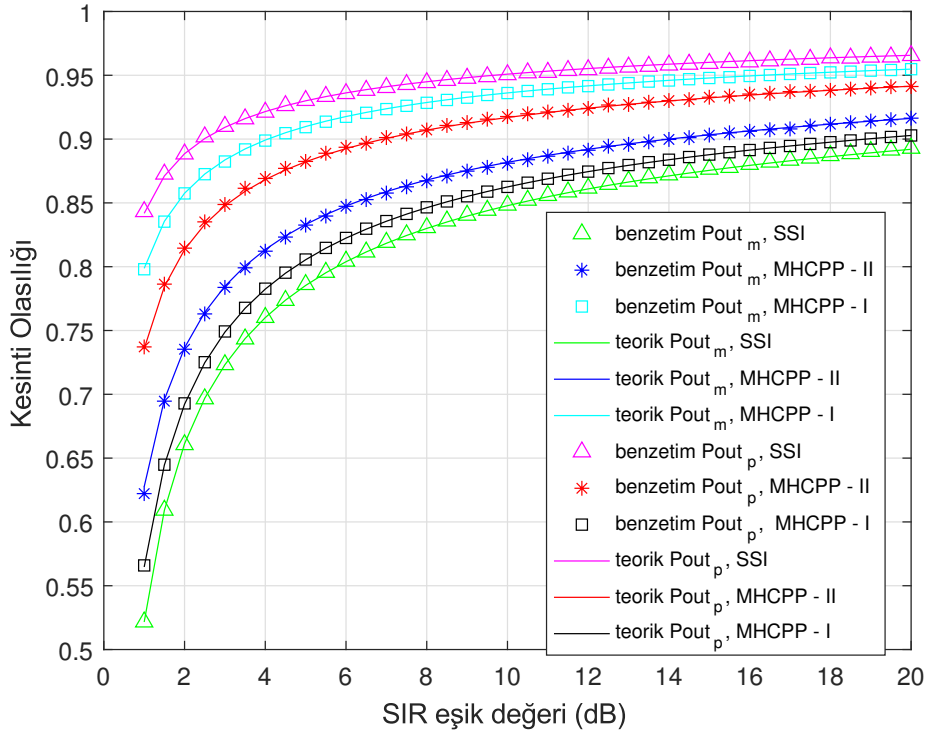
diğer HCPP modellerine göre daha yüksek olacaktır ve enerji verimliliği ters orantılı olarak daha düşük olacaktır.

Benzer olarak Şekil 5.22'de  $\rho_1$ 'e göre, Şekil 5.23'te  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre, Şekil 5.24'te ise  $\gamma$  SIR eşik değerine göre değişmekte olan alan spektral verimlilik grafikleri verilmiştir. Her üç şekilde de MHCPP-I modelinin alan spektral verimliliğinde en iyi model oldukları görülmektedir. PBS yoğunluğu MBS yoğunluğundan daha büyük olduğu için ( $\rho_2 = 2\rho_1$ ) (4.13) denklemindeki alan spektral verimliliğindeki etkisi MBS yoğunluğuna göre daha büyüktür. Ayrıca MHCPP-I modelindeki PBS'lerin kapsama olasılığı diğer üç modele göre Şekil 5.26'te görüldüğü gibi daha yüksek olduğundan alan spektral verimliliği de daha yüksek olacaktır.

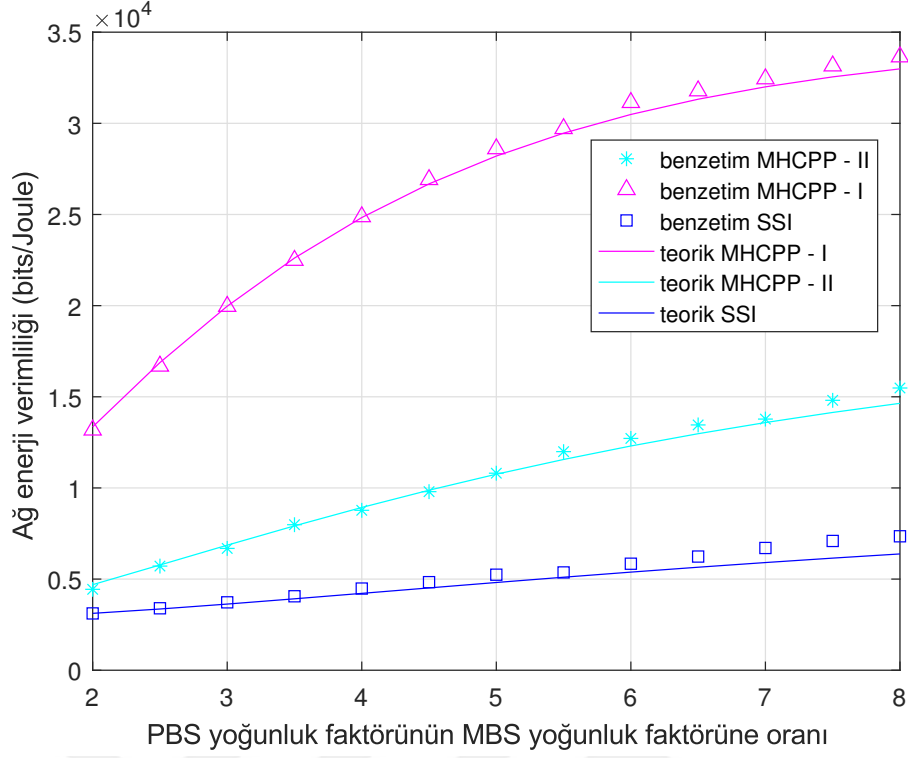
Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da sırasıyla SIR eşik değerine göre azalmakta olan MBS ve PBS'lerin kapsama olasılık grafikleri verilmiştir. MBS'ler için en iyi kapsama olasılığı sonucunu veren model PPP iken PBS'ler için ise MHCPP-I modeli en uygundur. PPP modelinde MBS kaldırma işlemi yapılmadığından en yüksek MBS yoğunluğuna



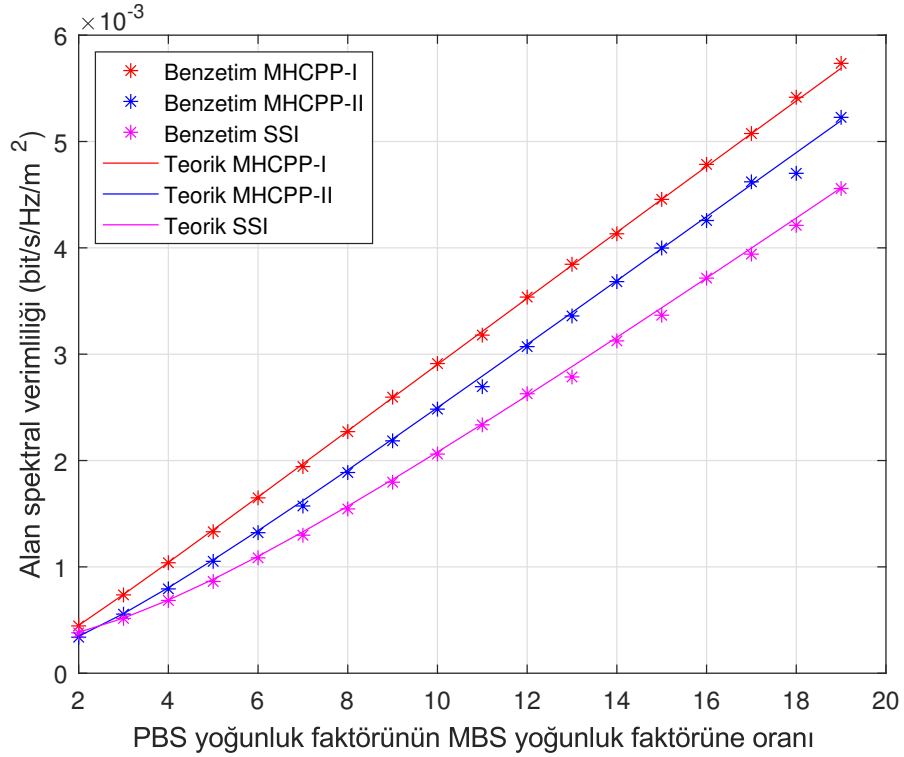
Şekil 5.14 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\gamma$ 'ya göre değişen kapsama olasılığı.  $\rho_2/\rho_1=5$ . Teorik sonuçlar çizgi ile benzetim sonuçları ise işaretler ile gösterilmiştir.



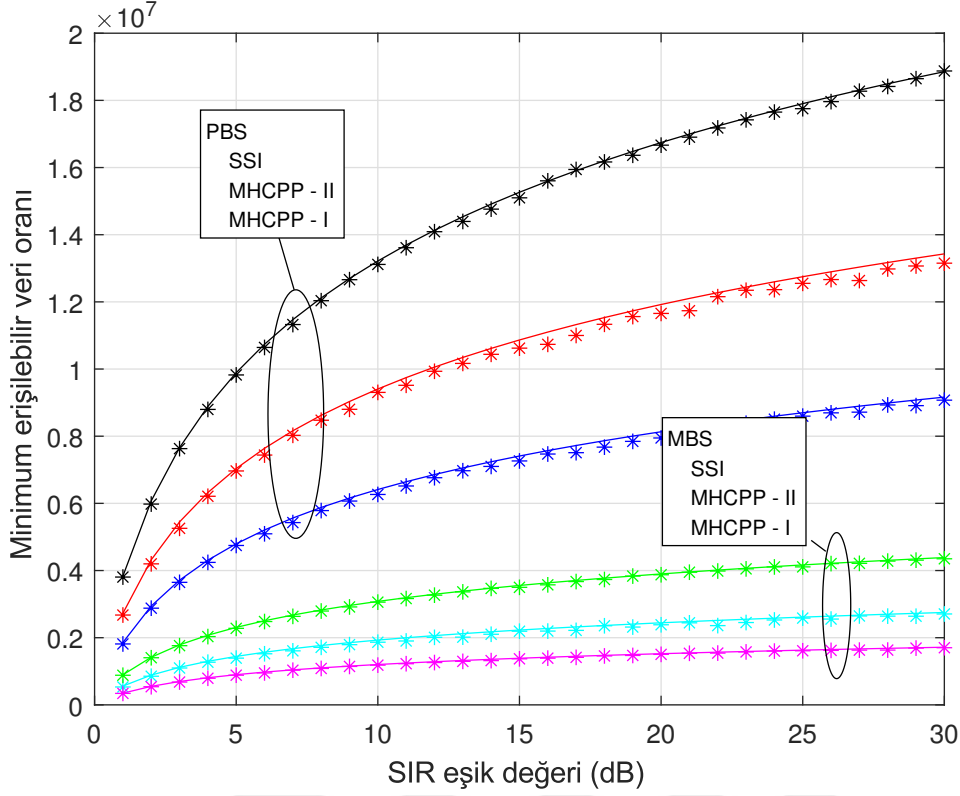
Şekil 5.15 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\gamma$ 'ya göre değişen kesinti olasılığı.  $\rho_2/\rho_1=5$ .



Şekil 5.16 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_1=0.1$ ,  $\gamma=0$  dB.



Şekil 5.17 : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_1=0.1$ ,  $\gamma=0$  dB.



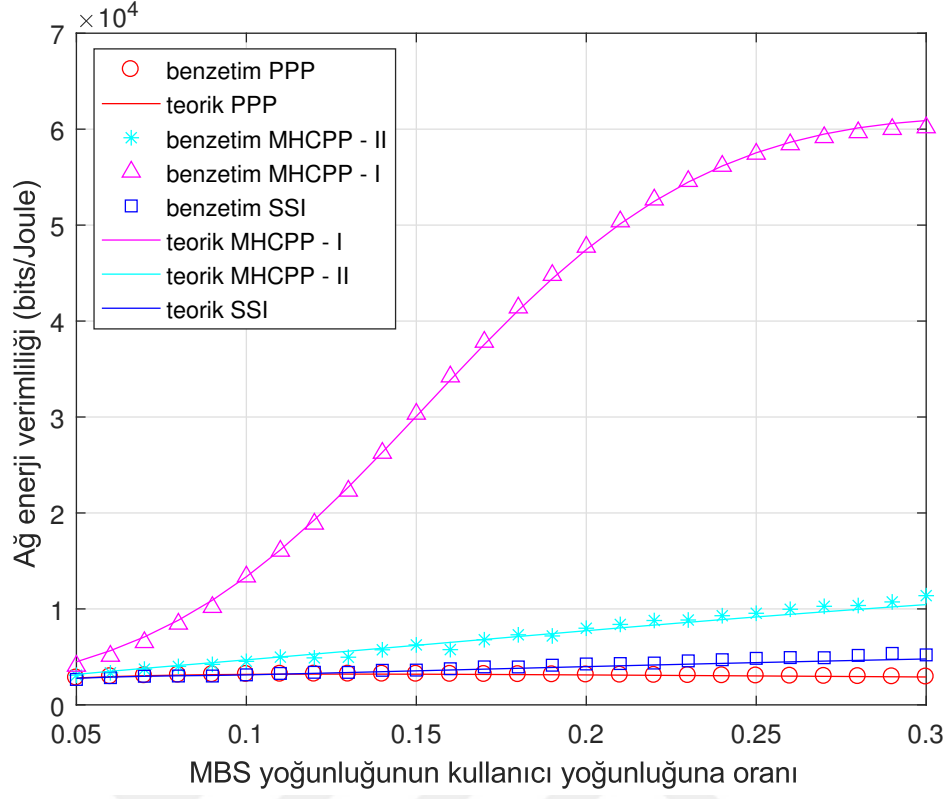
**Şekil 5.18** : MBS'lere HCPP ve PBS'lere PHP uygulanarak elde edilen süreçte  $\gamma$ 'ya göre değişen minimum erişilebilir veri oranı.  $\rho_2/\rho_1=2$

sahip süreçtir. Yüksek yoğunlukta olan yüksek iletim gücündeki MBS'lerin kapsama olasılığı diğer süreçlere göre daha yüksek olacaktır.

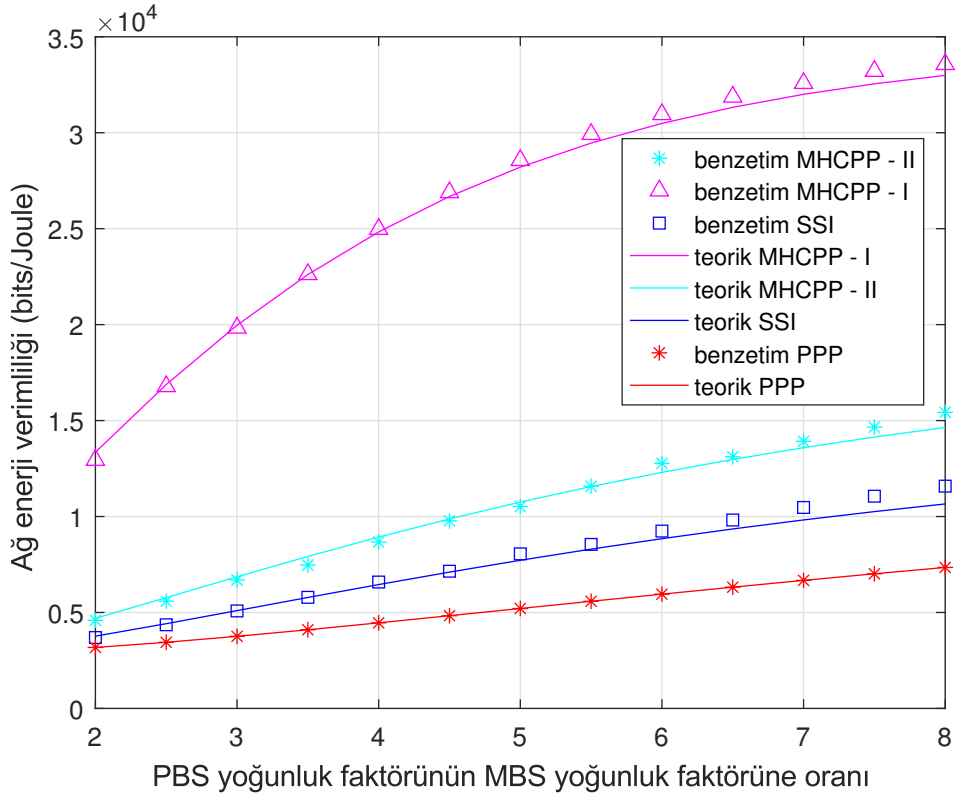
Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de sırasıyla SIR eşik değerine göre artmakta olan MBS ve PBS'lerin kesinti olasılık grafikleri verilmiştir. MBS'ler için en iyi kesinti olasılığı sonucunu veren model MHCPP-I iken PBS'ler için ise PPP modeli en uygundur.

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da sırasıyla SIR eşik değerine göre artmakta olan MBS ve PBS'lerin minimum erişilebilir veri oranı grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de minimum erişilebilir veri oranında PPP modeli en iyi model olarak gözlemlenmiştir. Çünkü PPP modelinde herhangi bir BS kaldırma işlemi yapılmadığından diğer modellere oranla daha yoğun BS'lere sahiptir. BS'lerin yoğun olduğu ağda (4.10) denkleminde göre servis sağlanan ortalama kullanıcı sayısı da yüksek olmaktadır. Dolayısıyla, (4.9) denkleminde PPP modelinin diğer HCPP modellerine oranla daha yüksek veri oranı elde edebileceği görülmektedir.

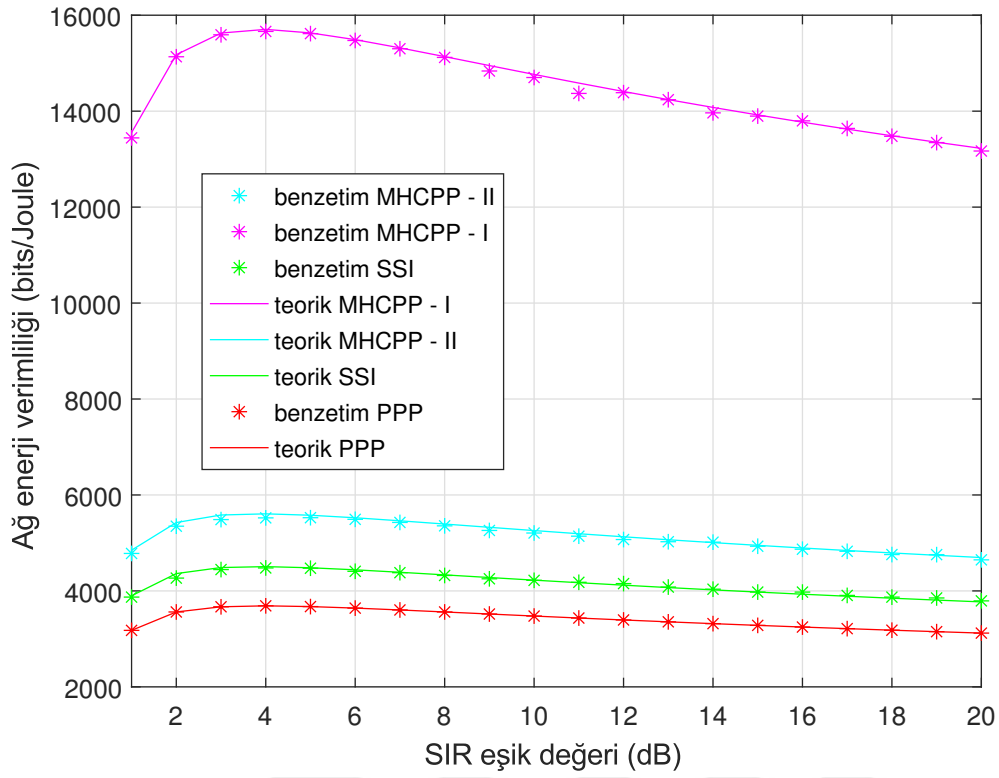




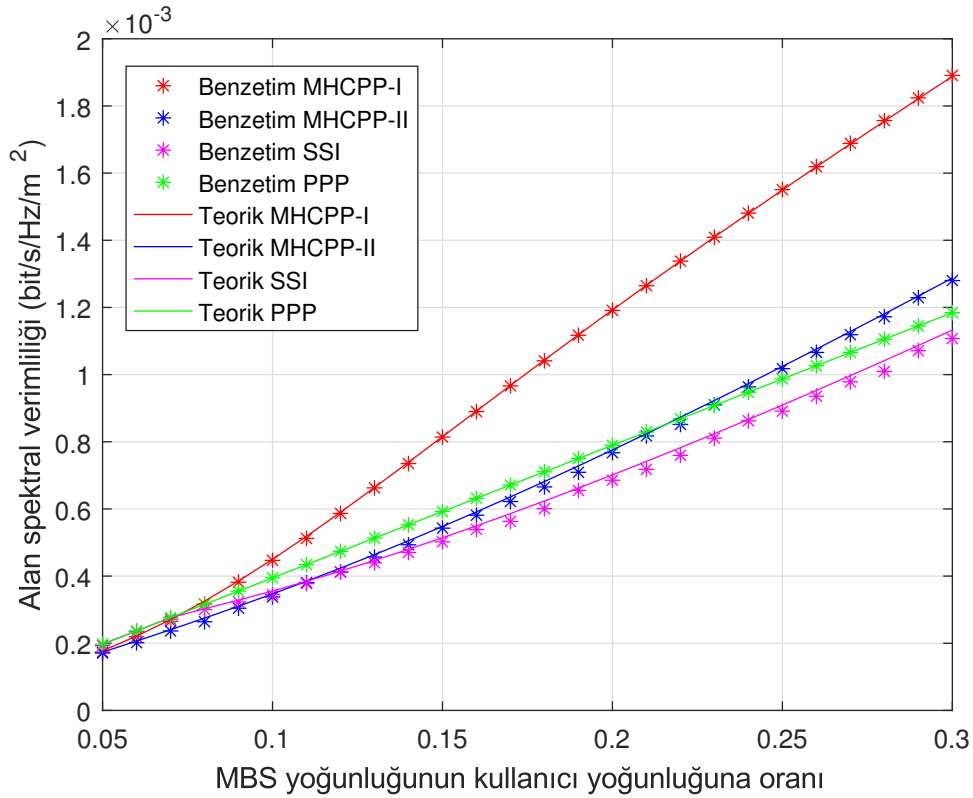
Şekil 5.19 :  $\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ ,  $\gamma=0$  dB.



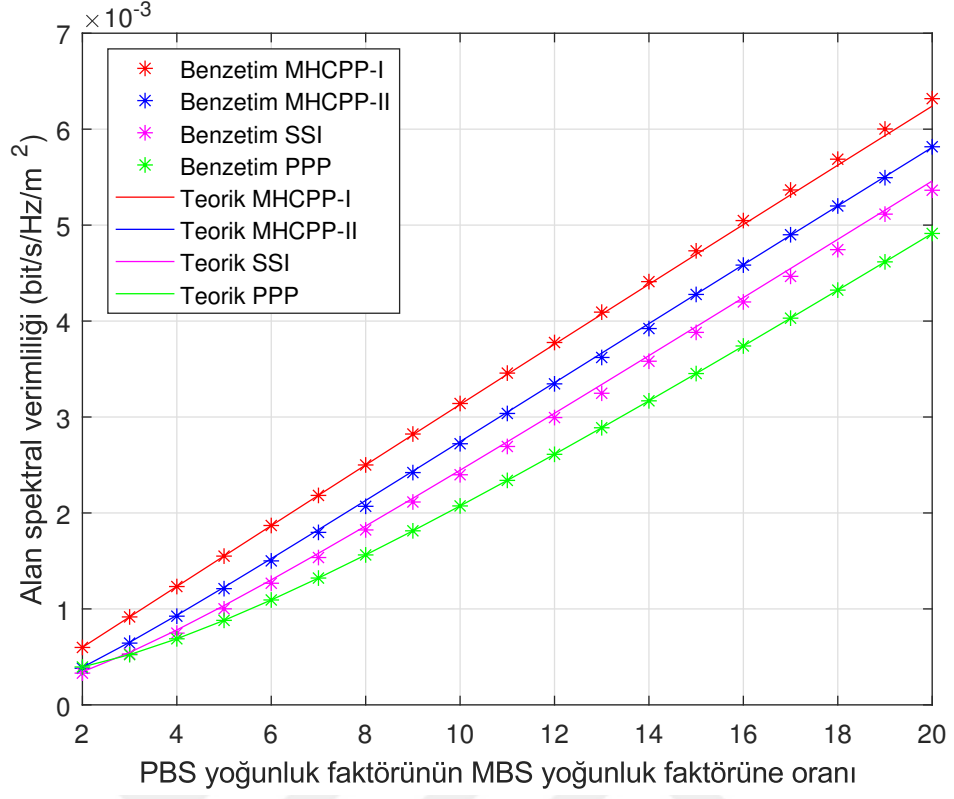
Şekil 5.20 :  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_1=0.1$ ,  $\gamma=0$  dB.



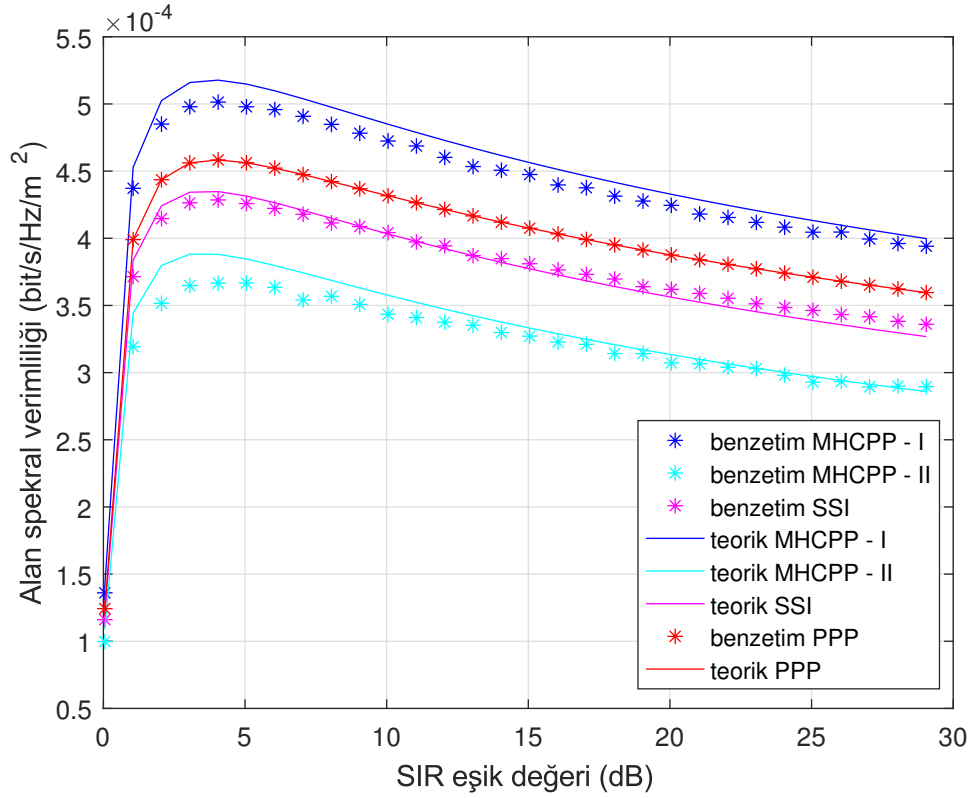
Şekil 5.21 :  $\gamma$ 'ya göre değişen ağ enerji verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ .



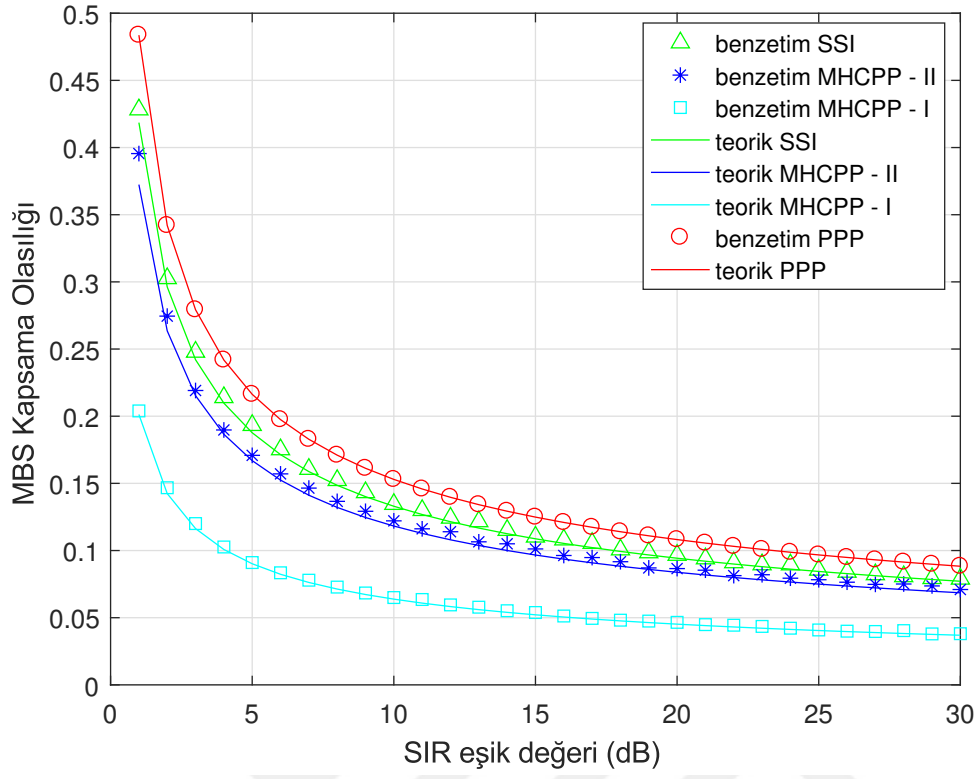
Şekil 5.22 :  $\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ ,  $\gamma=0$  dB.



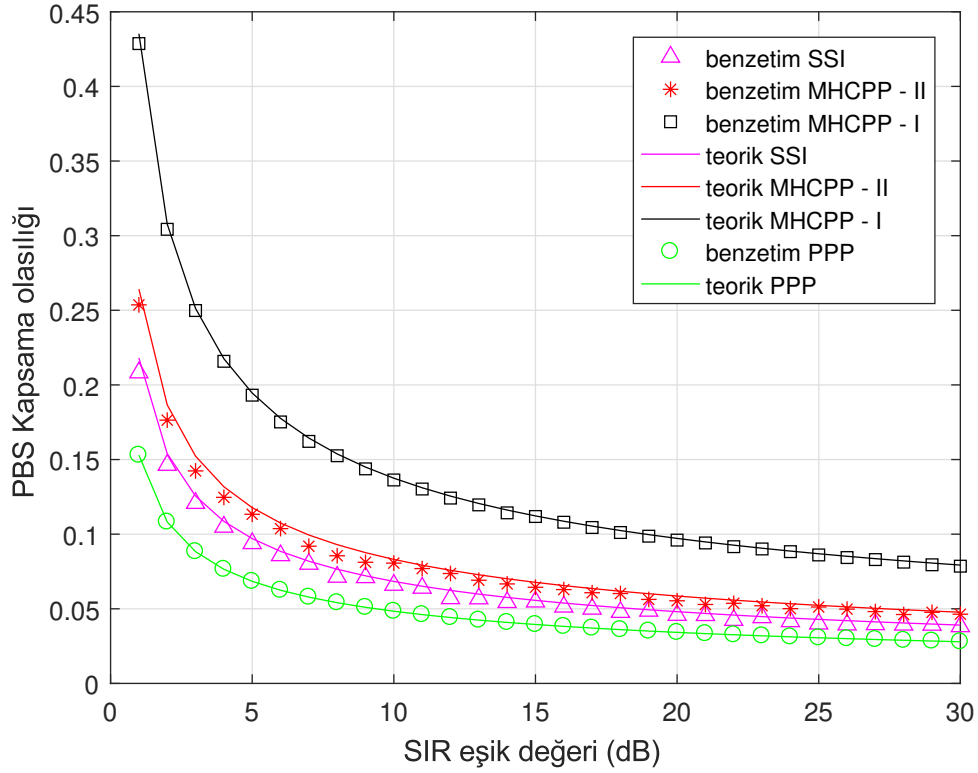
Şekil 5.23 :  $\rho_2/\rho_1$ 'e göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_1=0.1$ ,  $\gamma=0$  dB.



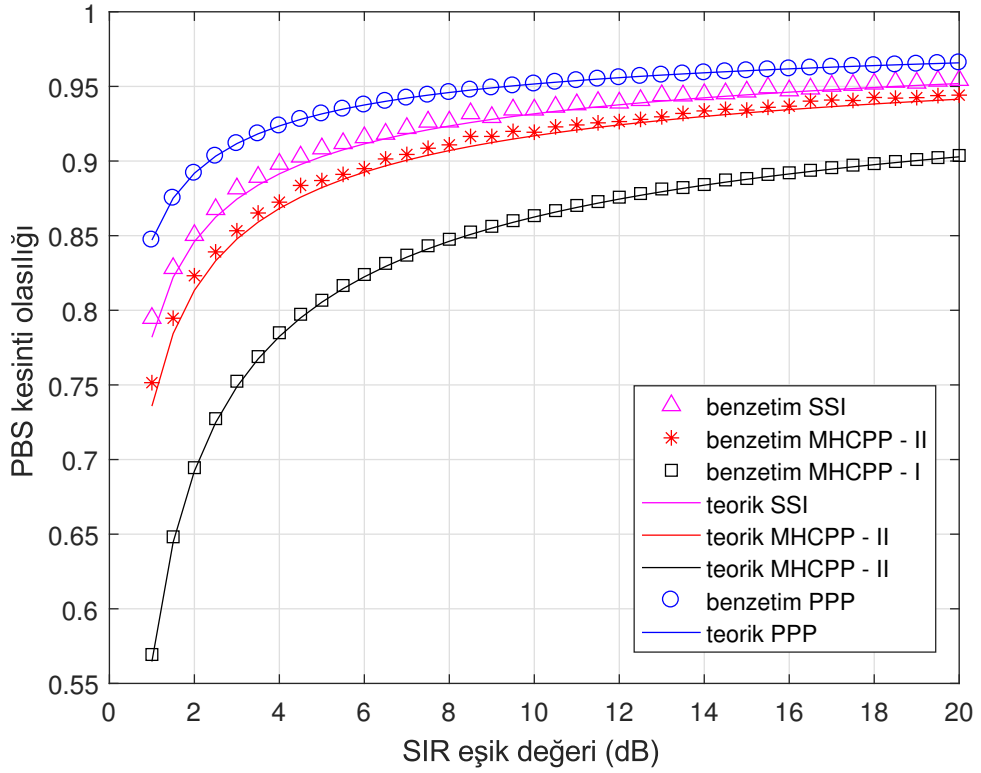
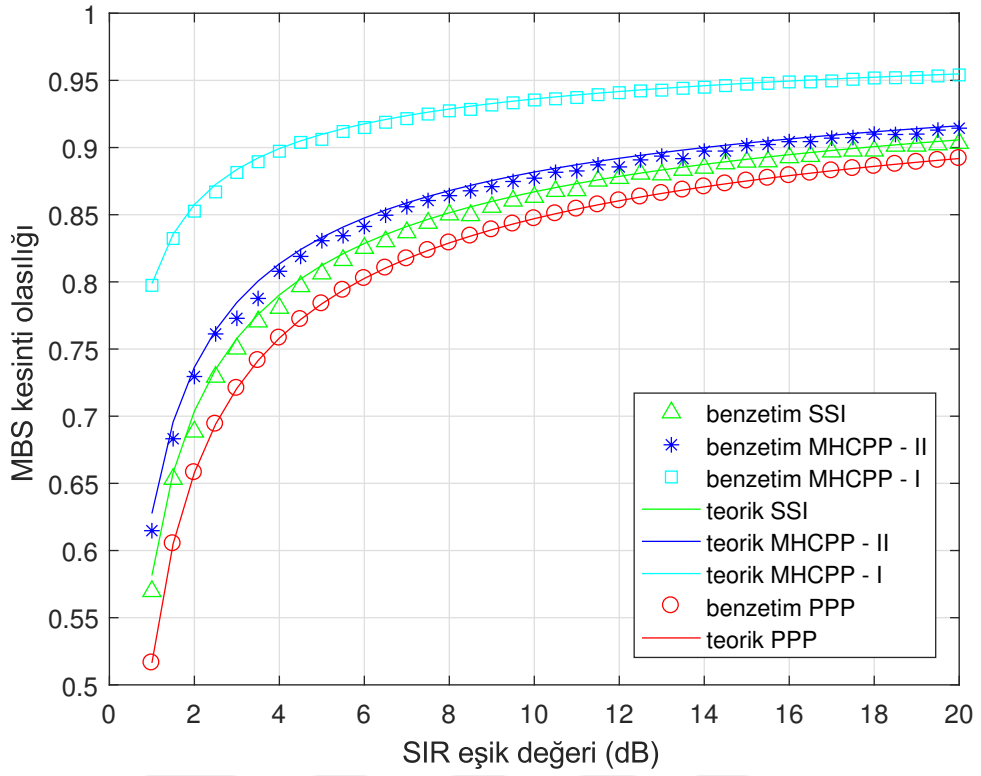
Şekil 5.24 :  $\gamma$ 'ya göre değişen alan spektral verimliliği.  $\rho_2/\rho_1=2$ .

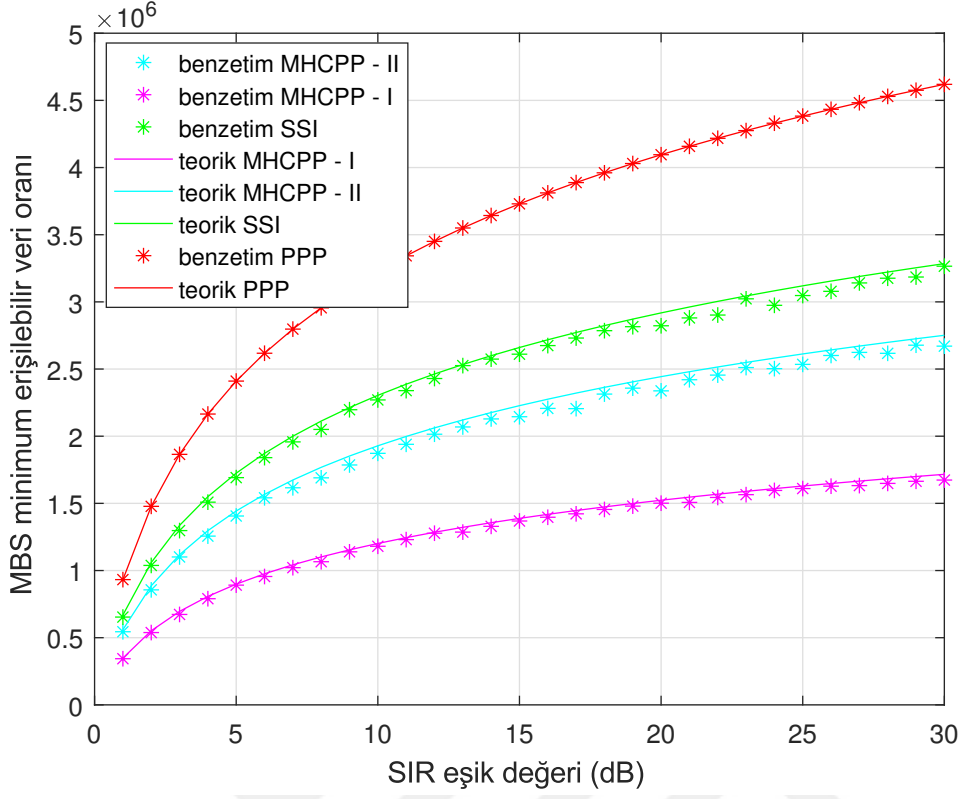


Şekil 5.25 :  $\gamma$ 'ya göre değişen MBS kapsama olasılığı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .

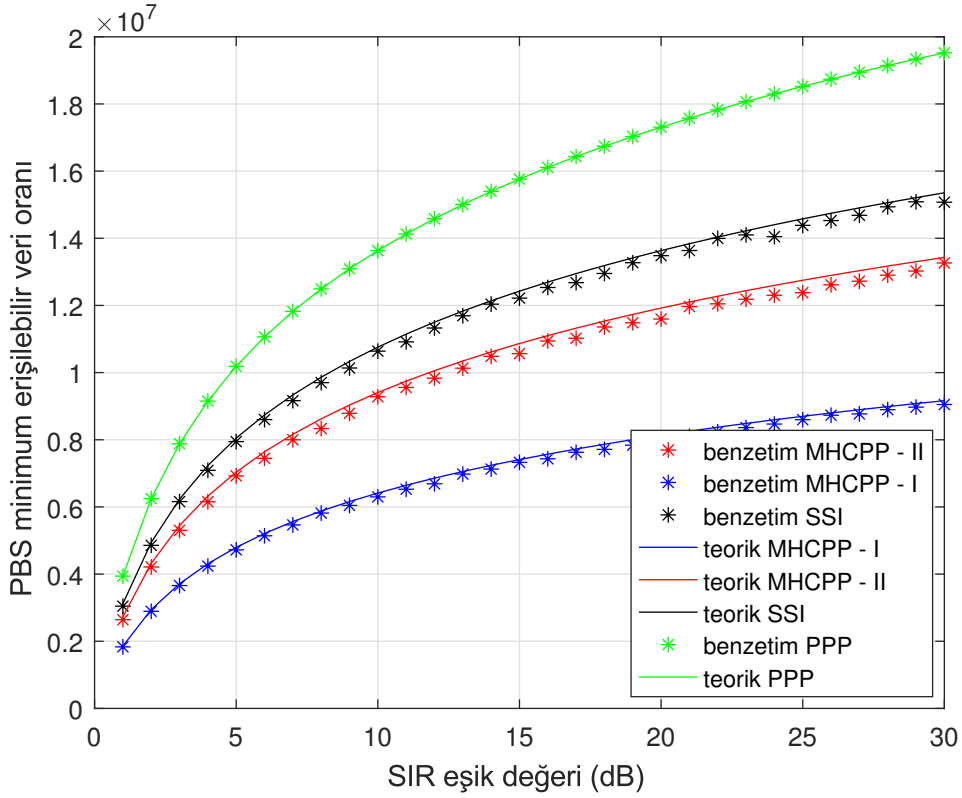


Şekil 5.26 :  $\gamma$ 'ya göre değişen PBS kapsama olasılığı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .





Şekil 5.29 :  $\gamma$ 'ya göre değişen MBS minimum erişilebilir veri oranı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .



Şekil 5.30 :  $\gamma$ 'ya göre değişen PBS minimum erişilebilir veri oranı.  $\rho_2/\rho_1=2$ .

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak stokastik geometri modelleri olan PPP, PHP ve HCPP kullanılarak HetNet'te BS yoğunluğunun ağ enerji ve alan spektral verimliliğine olan etkisi analiz edilmiştir. MBS, PBS ve kullanıcılar için sadece PPP modelinin kullanıldığı bir senaryo; MBS'ler için üç farklı HCPP, PBS'ler için PHP ve kullanıcılar için PPP modellerinin uygulandığı başka bir senaryo oluşturulmuş, sonrasında bu iki senaryonun karşılaştırılması yapılmıştır.

PBS'lerde kullanılan PHP modeli ile katmanlar arası bağımlılık sağlanmıştır. Bu sayede MBS'lere bağımlı olarak dağılan PBS'ler dışlanım bölgesi haricinde kalmıştır. HetNet'teki girişim oranını düşürülerek enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamıştır ve HCPP modelinin PPP modeline göre daha enerji verimli bir çözüm olduğu elde edilmiştir. Böylelikle en uygun bir BS yoğunluk oranı faktörüne göre maksimum enerji verimliliği elde edilebileceği gösterilmiştir ve teorik çıkarımların doğruluğu benzetimlerle desteklenmiştir. Ayrıca ağ kapasitesinin artırılarak HCPP modelleri ile PPP modeline göre alan spektral verimliliğin daha yüksek olduğu benzetim sonuçlarında gösterilmiştir.

HCPP modeli ile MBS katmanındaki BS'ler arasında, PHP modeli ile ise MBS ve PBS'ler arasında itme etkisi sayesinde PPP modeline göre gerçek hayata daha yakın bir HetNet modeli oluşturulmuştur.

Bununla birlikte aynı şekilde SIR eşik değerinin alan spektral verimliliğine ve ağ enerji verimliliğine olan etkisi incelenmiş ve her iki verimliliği maksimize eden optimum SIR eşik değeri elde edilmiştir.

Performans ölçütleri olarak her iki senaryo için kapsama olasılıkları, kesinti olasılıkları ve minimum erişilebilir veri oranları elde edilip karşılaştırılmıştır. MBS kapsama olasılığında PPP modelinin, PBS kapsama olasılığında ise HCPP modellerinin daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir. Ayrıca PPP modelinde herhangi bir baz istasyonu kaldırma durumu olmadığı için minimum erişilebilir veri oranı, HCPP

modellerindekine göre daha çok yoğunlukta BS içerdiğinden daha yüksek olarak elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda ise mevcut modelin geliştirilerek insansız hava araçlarını içeren çok katmanlı dinamik HetNet'lerde farklı stokastik geometri modelleri kullanılarak ağ enerji verimliliği analizlerinin yapılması hedeflenmektedir. Ayrıca bu çalışmada frekans tekrar kullanım katsayısı 1 olarak alınmıştır. Sonraki çalışmalarda ise frekans tekrar kullanımından etkin olarak yararlandırıldığı farklı senaryolar üzerinde durulacaktır. Bu sayede alan spektral verimliliğin bu çalışmadan daha da iyi sonuç vereceği öngörülmektedir.





## KAYNAKLAR

- [1] **Liu, C., Pan, Z., Liu, N. ve You, X.** (2011). A novel energy saving strategy for LTE HetNet, *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, s.1–4.
- [2] **Fan, C., Zhang, T. ve Zeng, Z.** (2017). Energy-Efficient Base Station Deployment in HetNet Based on Traffic Load Distribution, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, s.1–5.
- [3] **Buzzi, S., I, C., Klein, T.E., Poor, H.V., Yang, C. ve Zappone, A.** (2016). A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 697–709.
- [4] **Wu, J., Zhang, Y., Zukerman, M. ve Yung, E.K.** (2015). Energy-Efficient Base-Stations Sleep-Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(2), 803–826.
- [5] **Coskun, C.C. ve Ayanoglu, E.** (2014). Energy-Efficient Base Station Deployment in Heterogeneous Networks, *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(6), 593–596.
- [6] **Rao, J. ve Fapojuwo, A.O.** (2013). Analysis of load dependent energy efficiency of two-tier heterogeneous cellular networks, *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, s.3095–3099.
- [7] **Ren, Q., Fan, J., Luo, X., Xu, Z. ve Chen, Y.** (2015). Energy Efficient Base Station Deployment Scheme in Heterogeneous Cellular Network, *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, s.1–5.
- [8] **Kezhu Hong ve Yingbo Hua** (2006). Throughput of Large Wireless Networks on Square, Hexagonal and Triangular Grids, *Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, 2006.*, s.461–465.
- [9] **Sharma, R.K. ve Dewangan, A.** (2014). Study on coverage and rate probability in hexagonal cell structure using fractional frequency reuse, *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, s.1–5.
- [10] **Andrews, J.G., Baccelli, F. ve Ganti, R.K.** (2011). A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks, *IEEE Transactions on Communications*, 59(11), 3122–3134.

- [11] **Zhang, T., Zhao, J., An, L. ve Liu, D.** (2016). Energy efficiency of base station deployment in ultra dense HetNets: A stochastic geometry analysis, *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(2), 184–187.
- [12] **Ibrahim, A.M., ElBatt, T. ve El-Keyi, A.** (2013). Coverage probability analysis for wireless networks using repulsive point processes, *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, s.1002–1007.
- [13] **Al-Hourani, A., Evans, R.J. ve Kandeepan, S.** (2016). Nearest Neighbor Distance Distribution in Hard-Core Point Processes, *IEEE Communications Letters*, 20(9), 1872–1875.
- [14] **Chen, C., Elliott, R.C. ve Krzymień, W.A.** (2018). Empirical Distribution of Nearest-Transmitter Distance in Wireless Networks Modeled by Matérn Hard Core Point Processes, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(2), 1740–1749.
- [15] **Deng, N., Zhou, W. ve Haenggi, M.** (2015). Heterogeneous Cellular Network Models With Dependence, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(10), 2167–2181.
- [16] **Sattari, M. ve Abbasfar, A.** (2018). PHP-Based Coverage Analysis in Millimeter Wave Heterogeneous Cellular Network, *arXiv preprint arXiv:1804.02858*.
- [17] **Lagum, F.** (2019). Stochastic Geometry-Based Tools for Spatial Modeling and Planning of Future Cellular Networks: Opportunistic Cell Switch-off and Strategic Deployment of Flying Base Stations, *Doktora Tezi*, Carleton University.
- [18] **Saad, S.A., Ismail, M. ve Nordin, R.** (2013). A survey on power control techniques in femtocell networks., *JCM*, 8(12), 845–854.
- [19] **Kamel, M., Hamouda, W. ve Youssef, A.** (2016). Ultra-dense networks: A survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2522–2545.
- [20] **Lee, S. ve Huang, K.** (2012). Coverage and economy of cellular networks with many base stations, *IEEE Communications Letters*, 16(7), 1038–1040.
- [21] **Ding, M., López-Pérez, D., Mao, G., Wang, P. ve Lin, Z.** (2015). Will the area spectral efficiency monotonically grow as small cells go dense?, *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, s.1–7.
- [22] **Zhang, H., Huang, S., Jiang, C., Long, K., Leung, V.C. ve Poor, H.V.** (2017). Energy efficient user association and power allocation in millimeter-wave-based ultra dense networks with energy harvesting base stations, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(9), 1936–1947.
- [23] **Claussen, H., Ashraf, I. ve Ho, L.T.** (2010). Dynamic idle mode procedures for femtocells, *Bell Labs Technical Journal*, 15(2), 95–116.

- [24] **Galiotto, C., Pratas, N.K., Doyle, L. ve Marchetti, N.** (2017). Effect of LOS/NLOS propagation on 5G ultra-dense networks, *Computer Networks*, 120, 126–140.
- [25] **Hao, P., Yan, X., Yu-Ngok, R. ve Yuan, Y.** (2016). Ultra dense network: Challenges enabling technologies and new trends, *China Commun*, 13(2), 30–40.
- [26] **Zhong, Y. ve Zhang, W.** (2012). Downlink analysis of multi-channel hybrid access two-tier networks, *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, s.2479–2484.
- [27] **Soh, Y.S., Quek, T.Q., Kountouris, M. ve Shin, H.** (2013). Energy efficient heterogeneous cellular networks, *IEEE Journal on selected areas in communications*, 31(5), 840–850.
- [28] **Haenggi, M.** (2012). *Stochastic geometry for wireless networks*, Cambridge University Press.
- [29] **Zheng, W., Cui, Z., Cui, Q., Zhang, Y., Valkama, M. ve Jantti, R.** (2016). Energy consumption and outage performance analysis of Heterogeneous network with varying inter-tier dependence, *2016 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, IEEE, s.305–310.
- [30] **Richter, F., Fehske, A.J. ve Fettweis, G.P.** (2009). Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks, *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, IEEE, s.1–5.
- [31] **Dhillon, H.S., Ganti, R.K., Baccelli, F. ve Andrews, J.G.** (2012). Modeling and Analysis of K-Tier Downlink Heterogeneous Cellular Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(3), 550–560.
- [32] **Singh, S., Dhillon, H.S. ve Andrews, J.G.** (2013). Offloading in heterogeneous networks: Modeling, analysis, and design insights, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(5), 2484–2497.
- [33] **Wang, H., Li, C., Zeng, F., Zhen, A. ve Noonpakdee, W.** (2018). Success Probability And Area Spectral Efficiency In Cellular Networks, *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, IEEE, s.362–365.
- [34] **Wang, H., Leung, S. ve Song, R.** (2018). Uplink Area Spectral Efficiency Analysis for Multichannel Heterogeneous Cellular Networks With Interference Coordination, *IEEE Access*, 6, 14485–14497.



## ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mine ARDANUÇ

Doğum Tarihi ve Yeri: 24/04/1990, Samsun

E-Posta : ardanuc@itu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Matematik Mühendisliği
- **Y. Lisans:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Uygulamaları Anabilim Dalı, Bilgi Güvenliği Mühendisliği ve Kriptografi

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ardanuç, M.**, Başaran M., Durak-Ata, L., "Aşırı yoğun heterojen ağlarda Poisson boşluk süreci ile enerji verimli baz istasyonu yerleşimi," *IEEE 27. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU'2019) Bildiriler Kitabı*, Sivas, Nisan 2019. (Baskı için kabul edilmiştir.)
- Özyurt A. B., Başaran M., **Ardanuç, M.**, Durak-Ata L., "Intra-cell frequency band exiling for green cellular networks," *IET Electronics Letters*, June 2019. (Gönderildi.)
- **Ardanuç, M.**, Başaran M., Durak-Ata, L., "Energy and area spectral efficiency of base station deployment in HetNets using hard-core processes," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, June 2019. (Gönderildi.)