

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**802.11 KABLOSUZ YEREL ALAN AĞLARINDA NET  
VERİ HIZININ İNCELENMESİ**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Özgür YILDIRIM**

**FBE Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı Haberleşme Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Aktül Kavas**

**İSTANBUL, 2008**

|                                                                                                    |      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| KISALTMA LİSTESİ .....                                                                             | iv   |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                                | vi   |
| ÖNSÖZ .....                                                                                        | viii |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                     | 1    |
| 2. KABLOSUZ YEREL ALAN AĞLARINA GİRİŞ .....                                                        | 6    |
| 2.1 Kablosuz Yerel Alan Ağları .....                                                               | 6    |
| 2.2 Kablosuz Yerel Alan Ağı Standardları .....                                                     | 7    |
| 2.3 IEEE 802.11 Mimarisi ve Kullanılan Elemanları .....                                            | 7    |
| 2.4 IEEE 802.11 Katman Tanımları .....                                                             | 9    |
| 2.5 Temel Erişim Yöntemleri / Çarpışmadan Sakınma [Çoklu Erişim Taşıyıcı Algılama (CSMA/CA)] ..... | 9    |
| 2.6 Veri Paketlerinin Parçalanması ve Yeniden Birleştirilmesi .....                                | 10   |
| 2.7 Çerçeve Tipleri .....                                                                          | 11   |
| 2.8 Çoğullama ve Çoklu Erişim .....                                                                | 12   |
| 2.8.1 Frekans Bölüşümlü Çoğullama ve Çoklu Erişim .....                                            | 12   |
| 2.8.2 Zaman Bölüşümlü Çoğullama ve Çoklu Erişim .....                                              | 14   |
| 2.8.3 Kod Bölüşümlü Çoğullama ve Çoklu Erişim .....                                                | 15   |
| 2.9 Kullanılan Modülasyon Tekniği .....                                                            | 16   |
| 2.9.1 IEEE 802.11b Standardında Kullanılan Modülasyon Yöntemi .....                                | 17   |
| 2.9.2 IEEE 802.11a ve IEEE 802.11g Standardlarında Kullanılan Modülasyonlar .....                  | 24   |
| 3. NET VERİ HIZININ (THROUGHPUT) MODELLEMESİ .....                                                 | 28   |
| 3.1 Basit Erişim Yöntemi (BAM) ve CSMA/CA .....                                                    | 28   |
| 3.2 Ara Çerçeve Boşlukları (Inter Frame Spaces, IFS) .....                                         | 31   |
| 3.3 Üssel Geri Sayım Algoritması (Exponential Backoff Algorithm) .....                             | 33   |
| 3.4 Çerçeve Tipleri .....                                                                          | 35   |
| 3.4.1 MAC Çerçeve Formatı .....                                                                    | 35   |
| 3.4.2 RTS Çerçeve Formatı .....                                                                    | 36   |
| 3.4.3 CTS Çerçeve Formatı .....                                                                    | 36   |
| 3.4.4 ACK Çerçeve Formatı .....                                                                    | 37   |
| 3.5 PCF (Point Coordination Function), Nokta Eşgüdüm Fonksiyonu .....                              | 37   |
| 3.6 Uç Uca Bağlantı (Ad Hoc) Modu .....                                                            | 37   |
| 3.7 Fiziksel Katman .....                                                                          | 38   |
| 3.8 802.11 Kablosuz Ağlarda Net Veri Hızının Modellenmesi .....                                    | 40   |
| 3.8.1 Maksimum Net Veri Hızı .....                                                                 | 40   |
| 3.8.2 IEEE 802.11b kablosuz ağlarda net veri hızı: .....                                           | 41   |
| 3.8.3 IEEE 802.11g kablosuz ağlarda net veri hızı: .....                                           | 43   |
| 4. 802.11 KABLOSUZ AĞLARDA NET VERİ HIZI ÖLÇÜMLERİ .....                                           | 48   |
| 4.1 Uygulama Ortamının İncelenmesi .....                                                           | 48   |
| 4.2. Net Veri Hızının Ölçülmesi .....                                                              | 56   |
| 5. SONUÇLAR .....                                                                                  | 65   |
| KAYNAKLAR .....                                                                                    | 68   |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| INTERNET KAYNAKLARI .....                                            | 69  |
| EKLER .....                                                          | 70  |
| Ek 1: Uygulama Ortamı Boş Kanal Girişim Değerlerinin Ölçülmesi ..... | 70  |
| Ek 2: Net Veri Hızı Ölçümleri ( 2422MHz için).....                   | 77  |
| Ek 3: Net Veri Hızı Ölçüm Sonuçları.....                             | 92  |
| Ek 4: SNR / Net Veri Hızı Tablosu .....                              | 107 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                       | 116 |

## KISALTMA LİSTESİ

|          |                                                                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AP:      | Access Point (Erişim noktası)                                                                               |
| BER:     | Bit Error Rate (Bit hata oranı)                                                                             |
| BSS:     | Basic Service Set (Temel hizmet takımı)                                                                     |
| CCA:     | Clear Channel Assessment (Temiz kanal değeri)                                                               |
| CCK:     | Complementary Code Keying (Tamamlayıcı kod anahtarlama)                                                     |
| CMA:     | Constant Modulus Algorithm (Sabit modül algoritması)                                                        |
| CRC:     | Cyclic Redundancy Check (Dönüşsel artıklık denetimi)                                                        |
| CSMA:    | Carrier Sense Multiple Access (Çoklu erişim taşıyıcı algılama)                                              |
| CSMA/CA: | Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (Çoklu erişim taşıyıcı algılama/Çarpışmadan sakınma) |
| CSMA/CD: | Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (Çoklu erişim taşıyıcı algılama/Çarpışma Önmele)     |
| CTS:     | Clear To Send (Gönderim için müsait)                                                                        |
| CW:      | Contention Window (Çekişme penceresi)                                                                       |
| dB:      | Decibels (Desibel)                                                                                          |
| DCF:     | Distributed Coordination Function (Dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu)                                      |
| DECT:    | Digital European Cordless Telephony (Avrupa sayısal telsiz telefon)                                         |
| DIFS:    | Distributed Interframe Space (Dağıtılmış ara çerçeve boşluğu)                                               |
| DS:      | Distribution System (Dağıtım sistemi)                                                                       |
| DSSS:    | Direct Sequence Spread Spectrum (Doğrudan sıralı yayılı spektrum)                                           |
| EIFS:    | Extended Interframe Space (Genişletilmiş ara çerçeve boşluğu)                                               |
| ESS:     | Extended Service Set (Genişletilmiş hizmet takımı)                                                          |
| FCS:     | Frame Check Sequence (Sıralı çerçeve kontrolü)                                                              |
| FHSS:    | Frequency Hopping Spread Spectrum (Frekans zıplamalı yayılı spektrum)                                       |
| ID:      | Station Identifiers (Kullanıcı kimliği)                                                                     |
| IEEE:    | Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)              |
| IFS:     | Inter Frame Space (Ara çerçeve boşluğu)                                                                     |
| IP:      | Internet Protocol (İnternet protokolü)                                                                      |
| IPTV:    | Internet Protocol Television (İnternet üzerinden televizyon)                                                |
| IR:      | Infrared (Kızıl ötesi)                                                                                      |

|       |                                                                                    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| ISM:  | Industrial, Scientific and Medical (Endüstri, Fen, Sağlık)                         |
| LAN:  | Local Area Network (Yerel alan ağı)                                                |
| MAC:  | Medium Access Control (Ortam erişim kontrol)                                       |
| MIMO: | Multi Input Multi Output system (Çoklu giriş çoklu çıkış)                          |
| NAV:  | Network Allocation Vector (Ağ paylaşırma vektörü)                                  |
| OFDM: | Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dikgensel frekans bölüşümlü çoğullama) |
| OSI:  | Open Systems Interconnection (Birbirine bağımlı açık sistem)                       |
| PCF:  | Point Coordination Function (Noktasal koordinasyon fonksiyonu)                     |
| PHY:  | Physical Layer (Fiziksel katman)                                                   |
| PIFS: | Priority Interframe Space (Öncelik ara çerçeve boşluğu)                            |
| PLCP: | Physical Layer Convergence Procedure (Fiziksel katman yakınsama prosedürü)         |
| PMD:  | Physical Medium Dependent (Fiziki ortama bağımlı)                                  |
| RA:   | Receiver Address (Alıcı adresi)                                                    |
| RF:   | Radio Frequency (Radyo frekansı)                                                   |
| RTR:  | Ready To Receive (Alıma hazır)                                                     |
| RTS:  | Request To Send (Gönderim talebi)                                                  |
| SIFS: | Short Interframe Space (Kısa ara çerçeve boşluğu)                                  |
| SNR:  | Signal to Noise Ratio (İşaret gürültü oranı)                                       |
| TA:   | Transmitter Address (Verici adresi)                                                |
| VoIP: | Voice Over Internet Protocol (İnternet üzerinden ses)                              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 İki hücreli kablosuz ağ.....                    | 18 |
| Şekil 2.2 802.11 katman tanımları.....                    | 19 |
| Şekil 2.3 Veri paketi.....                                | 21 |
| Şekil 2.4 Çerçeve yapısı.....                             | 21 |
| Şekil 2.5 FDMA.....                                       | 22 |
| Şekil 2.6 TDMA.....                                       | 24 |
| Şekil 2.7 CDMA.....                                       | 26 |
| Şekil 2.8 5.5 Mbps veri iletimi.....                      | 30 |
| Şekil 2.9 11 Mbps veri iletimi.....                       | 30 |
| Şekil 2.10 DSSS blok diagramı .....                       | 31 |
| Şekil 2.11 İşaretin Alınması.....                         | 32 |
| Şekil 2.10 DSSS PLCP çerçeve yapısı .....                 | 34 |
| Şekil 2.11 16-QAM(8,8) ve 16-QAM(4,12).....               | 36 |
| Şekil 2.12 16 APK (4, 8, 4).....                          | 36 |
| Şekil 2.13 64 QAM.....                                    | 37 |
| Şekil 3.1 Basit Erişim Yöntemi ve zamanlama.....          | 39 |
| Şekil 3.2 RTS/CTS/Veri/ACK ve NAV akışı.....              | 41 |
| Şekil 3.3 CW'nin üssel artışına bir örnek .....           | 44 |
| Şekil 3.4 Genel MAC çerçeve yapısı.....                   | 45 |
| Şekil 3.5 RTS Çerçevesi .....                             | 46 |
| Şekil 3.6 CTS Çerçevesi .....                             | 46 |
| Şekil 3.7 ACK Çerçevesi .....                             | 47 |
| Şekil 3.8 Uç aca bağlantı çalışma modu .....              | 48 |
| Şekil 3.9 IEEE 802.11 Kanal/Frekans Spectrumu.....        | 49 |
| Şekil 4.1 Uygulama ortamında kablosuz istemci konumu..... | 58 |
| Şekil 4.2 Kalamış marina.....                             | 59 |
| Şekil 4.3 Kalamış marina.....                             | 60 |
| Şekil 4.4 Kalamış marina.....                             | 60 |
| Şekil 4.5 Net IQ Chariot.....                             | 62 |
| Şekil 4.6 Air Magnet ile boş kanal gürültüsü ölçümü.....  | 63 |
| Şekil 4.7 Air Magnet ile paket analizi.....               | 64 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.8 Air Magnet ile işaret/gürültü oranı ölçümü..... | 65 |
| Şekil 4.9 Mesafe/Alıcı güç eşleşmesi.....                 | 67 |
| Şekil 4.10 Net veri hızının SNR'a göre değişimi.....      | 72 |
| Şekil 4.11 SNR – Net veri hızı eğri eşleme.....           | 73 |

## ÖNSÖZ

Tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Aktül Kavas’a yüksek lisans bitirme tezime katkılarından ötürü teşekkür etmek isterim. Yüksek Lisans eğitim sürem boyunca gerek derslerde gerekse bitirme tezimde bana destek olarak, zorlandığım anlarda her daim rehberliğini esirgememiştir. Yüksek lisans eğitimimde her zaman teorilerin uygulama alanlarını ve gerçek yaşamdaki kullanımlarını bana göstererek daha başarılı bir mühendis olma ve mühendis gibi düşünebilme yolunda bütün meslek hayatımda hatırlayacağım çok önemli katkıları olmuştur.

AirTies’daki çalışma arkadaşlarım ve yöneticilerime yüksek lisans yapma isteğimi olumlu karşıladıkları ve derslere katılabilmem için gerekli zamanı bana verdikleri için teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarına sonsuz katkıları olan aileme ve bütün arkadaşlarıma teşekkür etmek isterim. Onlar olmadan bütün bu çalışmaları yapabilmem mümkün olmazdı.

## **802.11 KABLOSUZ YEREL ALAN AĞLARINDA NET VERİ HIZININ İNCELENMESİ**

**Özgür YILDIRIM**

Haberleşme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Kablosuz ağlarda genellikle bant genişliği üzerinde durulmuş fakat kablosuz yerel alan ağlarında iletişimi ve trafik akış hızını belirleyen net veri hızı (throughput) üzerinde fazla durulmamıştır. Bu çalışma ile IEEE 802.11 standardına göre trafik akışı esnasında gönderilen paketlerin yapıları ve boyutları standarda atıfta bulunarak ortaya konmuştur. IEEE 802.11 ağları üzerinde haberleşme yapılırken gönderilen paketlerin boyutlarından yola çıkarak haberleşmenin tamamlanması için gereken zaman hesaplanmış ve net veri hızı matematiksel olarak teorik ortamda hesaplanmıştır.

Frekans ve mesafe değişkenlerinin net veri hızı üzerindeki etkileri ölçümler yapılarak araştırılmıştır. Frekans ve girişim ölçüm yöntemleri ve araçları tanımlanmış ve 30 farklı mesafe ve 13 farklı frekans için net veri hızı ölçümleri yapılmıştır. Doğru frekans seçimi ile kablosuz ağlarda net veri hızının 30%’lara varan oranlarda arttırılabileceği gözlemlenmiştir. Mesafeye ve girişime bağlı bir fonksiyon olan, işaret sinyal gücünün gürültü gücüne oranının (SNR), net veri hızı üzerindeki etkileri incelenmiş ve ölçüm sonuçları üzerinden bir modelleme yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** IEEE 802.11a, IEEE 802.11 b, IEEE 802.11g, net veri hızı.

**JÜRİ:**

1. Yrd. Doç. Dr. Aktül Kavas
2. Yrd. Doç. Dr. A.Tevfik İnan
3. Yrd. Doç. Dr. Lütfiye Durak

# THROUGHPUT INVESTIGATIONS ON 802.11 WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS

Özgür YILDIRIM

Electronics and Communication Engineering, M.S. Thesis

Bandwidth is the main concern of wireless networks, however there has not been much study on throughput that defines reel connection and network speed of wireless networks. The structure and size of the packets which are communicated in wireless networks are described as referenced to IEEE 802.11 standards. Theoretical measurements of throughput are calculated according to the time interval which is needed to transmit as sized packets.

The effects of frequency and distance on throughput are investigated with measurements. The techniques of noise measurements are described and throughput is measured for 30 different distances at 13 different frequencies. Up to 30% throughput save is observed with the choice of the right channel. Effects of signal to noise ratio (SNR), which is a function of distance and power of interference, on throughput are researched and result of measurements are formed into mathematical models.

**Keywords:** IEEE 802.11a, IEEE 802.11 b, IEEE 802.11g, throughput.

JURY:

1. Yrd. Doç. Dr. Aktül Kavas
2. Yrd. Doç. Dr. A.Tevfik İnan
3. Yrd. Doç. Dr. Lütfiye Durak

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelerin her safhası hızlı bir şekilde ilerlemekte ve bireylerin yaşam şeklini değiştirmektedir. Günümüze baktığımızda kablosuz iletişim teknolojilerinin yeni bir dönüm noktası olacağını gözlemlemek olasıdır. Kablosuz iletişim teknolojisi, en basit tanımıyla, noktadan noktaya veya bir ağ yapısı şeklinde bağlantı sağlayan, bir teknolojidir. Kablosuz iletişim teknolojisini diğerlerinden ayıran nokta ise elektromanyetik dalgaların iletim ortamı olarak havayı kullanmasıdır.

Elektromanyetik dalgalar, foton adı verilen ayrık enerji paketlerinden oluşur. Bir foton titreşim halindeki bir elektrik alan (E) ve titreşim halindeki bir manyetik alan (H) bileşeninden oluşur. Bu bileşenler birbirlerine ve fotonun yayılma yönüne diktirler. Fotonun hareket yönü boyunca elektrik ve manyetik alan bileşenleri yer değiştirirler. Bir saniyede bu değişimler veya titreşimlerin sayısı frekans olarak adlandırılır ve Hertz (1/sn) ile ölçülür.

Farklı enerjilerdeki fotonlar, farklı şekillerde etkileşirler. Fotonlar enerji seviyelerine göre elektromanyetik spektrumda farklı yerlere sahiplerdir. Tablo 1.1’de bu frekans aralıkları belirtilmiştir.

|              |                                        |
|--------------|----------------------------------------|
| 3-30 KHz     | Çok Düşük Frekans (VLF)                |
| 30-300 KHz   | Uzun Dalga (LW)                        |
| 300-3000 KHz | Orta Dalga (MW)                        |
| 3-30 MHz     | Kısa Dalga (SW)                        |
| 30-300 MHz   | Yüksek Frekans (VHF)                   |
| 300-3000 MHz | Ultra Yüksek Frekans (UHF)             |
| 3-30 GHz     | Süper Yüksek Frekans (SHF- Mikrodalga) |
| 30-300 GHz   | Aşırı Yüksek Frekans (EHF)             |

**Tablo 1.1 Tanımlı Radyo Frekans Aralıkları**

Kablosuz haberleşmesinin temelinde gönderilecek verinin yüksek frekanslı taşıyıcı bir işaret ile çarpılması (Modülasyon), anten ile yayınlanması, alıcı anteni tarafından alınan işaret içinden

taşınan bilginin ayıklanması bulunmaktadır. Modüle edilmemiş bir işaret frekans spektrumunda ölçülemeyecek kadar küçük bir yer işgal eder. Ancak modülasyon gerçekleştiğinde spektruma bir yayılma gerçekleşecektir, bu yayılım işgal edeceği radyo frekansı aralığı kanal olarak adlandırılır.

Birim zamanda taşınacak bilgi miktarı arttıkça ihtiyaç duyulacak kanal kapasitesi de artacaktır. Antenden ayrılan radyo işareti mesafe ile ters orantılı olarak zayıflayacaktır. Alıcı uçta işaretin algılanabilmesi için işaretin belirli bir eşik değerinin üstünde bir güce sahip olması gerekir. Radyo yayının gerçekleştirileceği alan üzerindeki doğal veya insan yapısı engeller, radyo işaretinin zayıflamasına sebep olurlar. Ancak uzay boşluğunda bu engeller bulunmadığından radyo işaretleri oldukça uzun mesafeler boyunca taşınabilirler.

Radyo işaretinin üzerindeki etkilerden en önemlilerinden bir tanesi çok-yolluluktur (multipath). Bu etki elektromanyetik işaretin alıcısına sadece doğrudan yayılım ile değil, yerküre üzerindeki nesneler veya iyonosfer de meydana gelen girişim sonucu bir çok yoldan yansıması ile ulaşmasından kaynaklanır. Çok-yolluluk genellikle faz farkı olan işaretlerin birbirlerini bastırarak asıl işareti söndürmesine neden olmaktadır.

İşaret çeşitleri olarak iki tür işareten söz edebiliriz, Analog bir işaret belirli azami ve asgari değerleri arasında sürekli olarak değişen bir işaret iken sayısal işaretler, belirli bir zaman aralığının bütününde değil de sadece belirli zaman anlarında tanımlanmış ve sadece belirli değerler alabilen işaretler olarak tanımlanabilir.

Bir işaret genlik, frekans ve faz değerleri ile tanımlanabilir. Modülasyon bu üç temel karakteristik büyüklüğün biri veya birkaçının birden değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bu değişimler alıcı uçta iletilen işaretin yeniden oluşturmak için kullanılır. Kullanılan modülasyon türüne göre ihtiyaç duyulan kanal kapasitesi de farklılık gösterir. Genlik modülasyonunda frekans genişliği, bilgi işaretindeki en yüksek frekansın iki katı kadar olmalıdır(Nyquist kriteri). Frekans modülasyonunda ise bilgi işaretindeki en yüksek frekanstan birkaç katı olmalıdır. Her ne kadar frekans modülasyonu radyo spektrumunun verimsiz kullanımına sebep olsa da geniş kanallara yayılmış işaretler girişime çok daha dirençlidirler.

Sayısal işaretler de analog işaretler gibi, radyo işaretlerinin karakteristik özellikleri değiştirilerek iletebilirler. Sayısal iletimin ilk örneği Mors alfabesinin kullanıldığı telgraf

haberleşmesidir. Ancak radyo haberleşmesinde özellikle iletilen sıfırların algılanması çözülmesi gereken bir sorundur, alıcının işaretin sıfır mı yoksa sönümlenen bir işaret mi olduğunu ayırt edebilmesi gerekir.

Modern sayısal iletim sistemlerinde haberleşme kanalından daha fazla sayıda bit taşınabilmesi için frekans, faz ve genlik modülasyonlarının kombinasyonları kullanılmaktadır. Günümüzde kablosuz iletim sistemlerinde sayısal iletim tekniklerinin kullanımı yaygındır. Sayısal işaretler girişime daha bağışıklıdır; iletilen sayısal işaretlerde hata tespiti düzeltimi mümkündür. Ayrıca sayısal bilgi kolaylıkla sıkıştırılıp taşınabildiği gibi şifreleme daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Frekans spektrumu sonlu bir kaynaktır. Bu yüzden aynı anda iletimde bulunacak uçbirimlerin kaçınılmaz bir şekilde belirli frekans aralıklarını paylaşmaları söz konusudur. Frekans spektrumun bölünmesi ve birçok kullanıcı arasında paylaşımının birkaç yolu bulunmaktadır. En basit ve açık yol Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) yöntemidir. FDMA ile frekans spektrumu, frekans uzayında birbiri üzerine taşmayan bölmelere ayrılır. Bu bölmeler uçbirimlerin belirli bir çağrısı için elle veya otomatik olarak, uçbirimlere atanırlar. Örneğin 150 MHz'lik bir spektrum bloğu, 25 MHz bölmelere ayrılarak aynı anda altı uçbirimin eş zamanlı haberleşmesi sağlanabilir. Her bir çağrı için frekansı ayrı bir taşıyıcı işaret bulunacaktır. FDMA geleneksel olarak analog sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) yönteminde ise, eldeki spektrum zaman uzayı bölümlere ayrılmaktadır. Yukarıdaki örnekteki 150 MHz'lik blok bu sefer altı zaman bölmeli ve tekrar eden çerçevelere ayrılacak, çerçevenin her bir altı gözünde altı farklı çağrıya ait bitler yer alacaktır. Başka bir deyişle uçbirimler eldeki spektrumun, birim zamanda kendilerine ait 1/6'lık bölümüne sıra ile erişebileceklerdir. Eğer çerçeveler yeterince hızlı tekrar edilirse uçbirimler haberleşme sırasında bir kesilme ve gecikmeyi hissetmeyeceklerdir.

Üçüncü bir erişim yöntemi ise Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) olarak bilinir. Bu yöntem, zaman ve frekans bölmeli çoğullamanın karılmasından elde edilen, hem bir modülasyon ve hem de bir erişim yöntemidir. Bir dağılmış spektrum sisteminde bilgi işaretinin taşınması için, bilgi işaretinin sahip olduğu band genişliğinden çok daha geniş bir frekans aralığı kullanılır.

Yeni nesil kablosuz yerel alan ağlarının kullanmış olduğu çoğullama ve modülasyon yöntemlerinin başında Yayılı Spektrum (Spread Spectrum) teknolojisi gelmektedir. Kablosuz yerel ağ teknolojisi (Wireless Local Area Network-WLAN) açısından incelediğimizde iki çeşidi ile karşılaşmaktayız. Bunlar Frekans Atlamalı Yayılı Spektrum (Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS) ve Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum DHSS)'dir. Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), RF sinyalinin geniş bir bant aralığına oturtulması, ve bu aralığa yayılmış olan sinyalin verici - alıcı cihazlar tarafından işlenmesi teknolojisidir. Kablosuz yerel ağ standartlarını modülasyon tekniği belirlemektedir. IEEE 802.11b standartında Doğrudan sıralı yayılı spektum modülasyon tekniği kullanılmaktadır [IEEE, 1999].

Günümüzde gelişmekte olan en önemli kablosuz yerel ağ standardı IEEE 802.11a, IEEE 802.11g. Bu standartlar Dikgenel Frekans Bölüşümlü Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing OFDM) modülasyon tekniğini kullanmakta olup, bu çoğullama ve modülasyon yönteminde, faz kaydırma ve genlik kaydırma yöntemi aynı anda özel bir şekilde uygulanmakta olup geniş bant genişlikleri elde edilebilmektedir. OFDM radyo dalgaları üzerinden büyük miktarda veri transferi yapmak için kullanılan bir frekans bölüşümlü çoğullama (FDM - Frequency Division Multiplexing) modülasyon tekniğidir [Villanen, 2003].

OFDM radyo sinyalini daha küçük alt sinyallere bölüp aynı anda farklı frekanslardan alıcıya gönderme yöntemi ile çalışır. OFDM sinyal iletiminde meydana gelen çapraz karışmayı azaltan ve çoklu-yol gecikme yayılmasına ve kanal gürültüsüne tolerans tanıyan bir yöntemdir. Bu yüzden pek çok kablosuz uygulama için oldukça uygundur.

## **Tez Planı**

Bu tez kapsamında ilerleyen bölümlerde anlatılan çalışmalar aşağıdaki dizilim planı ile ele alınmaktadır:

2. bölümde, tez kapsamında araştırılan IEEE 802.11 kablosuz ağlarıyla ilgili temel bilgiler bulunmaktadır. 802.11 kablosuz ağ standartları, kablosuz ağ mimarisinin elemanları,

kablosuz ağlarda kullanılan modülasyon çeşitleri ve çoklu erişim yöntemleri gibi temel bilgiler bölüm 2’de anlatılmaktadır.

3. bölümde, 802.11b ve 802.11g kablosuz ağlarında net veri hızının (throughput) modellenmesi amaçlanmıştır. Kablosuz ağlarda veri iletiminin nasıl yapıldığı çeşitli örneklemelerle birlikte tanımlanmış, net veri hızının ideal ve çarpışmanın yaşanmadığı ortamlarda hangi değerlerde olacağı hesaplanmıştır. Kanalda paketlerin çarpışmasını önlemek için uygulanan çeşitli metodların net veri hızı üzerindeki etkileri hesaplanmıştır.

4. bölümde, mesafenin ve girişimin net veri hızı üzerindeki etkileri pratik ortamda uygulamalar ile gözlemlenmiştir. Alıcı ve verici cihazların birbirlerini doğrudan görüş ile görebildikleri bir ortamda net veri hızı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlere başlanmadan önce ölçümlerin yapıldığı bölge spektrum frekans analizörleri ile farklı dönemlerce incelenmiş, ölçümlerin yapılacağı bölgenin boş kanal frekans karakteristiği desibel cinsinden ortaya konulmuştur. Net veri hızı ölçümlerinde IEEE tarafından belirlenmiş ölçüm yöntemleri ve kuralları esas alınmış ve izlenmiştir. Verici ve alıcı arasındaki mesafe 1 metreden başlanarak 10’ar metre aralıklar ile arttırılmış ve 290 metre mesafeye kadar toplamda 30 farklı mesafede net veri hızı ölçümleri tekrarlanmıştır. Ölçüm yapılan her bir mesafe için 13 farklı frekans üzerinde net veri hızı ölçümleri tekrarlanmış ve toplamda 390 adet net veri hızı ölçümü yapılmıştır. Her bir net veri hızı ölçümü için 6 dakika boyunca alıcı ve verici cihaz aralarında TCP paket jeneratörleri ile veri akışı sağlanmıştır. İşaret sinyal gürültü gücü oranının (SNR – Signal to Noise Ratio) negatif olduğu, yani frekans gürültü gücünün işaret sinyal gücünden fazla olduğu bölgelerde, net veri hızının sıfır ölçüldüğü ve kablosuz haberleşmenin gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar grafiksel olarak 4. bölüm kapsamında raporlanmıştır. Yapılan ölçüm sonuçları ışığında, SNR’ın net veri hızı üzerindeki etkileri eğri eşleme algoritmaları yardımı ile modellenmiştir.

5. bölümde, bu tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları yorumlanmıştır.

## 2. KABLOSUZ YEREL ALAN AĞLARINA GİRİŞ

Bu bölümde kablosuz alan ağlarının genel mimari yapısı, çalışma sistemi ve alt bileşenleri gibi tez konusuna temel oluşturabilecek bilgiler yer almaktadır.

### 2.1 Kablosuz Yerel Alan Ağları

Kablosuz bilgisayar ağı cihazları, ilk olarak askeri ihtiyaçları karşılamak amacıyla geliştirilmiş, daha sonraları sivil amaçlarla da kullanılmaya başlanmıştır. Bu cihazlar ile oluşturulan kablosuz yerel ağ (WLAN), Ethernet teknolojisinin sağladığı tüm yarar ve kolaylıkları, kablo karmaşasını yaşatmadan, kendi bünyesinde taşır. Kablosuz iletişim teknolojisi, en basit tanımıyla, noktadan noktaya (Point to Point) veya bir ağ yapısı şeklinde bağlantı sağlayan, iletim ortamı olarak havayı kullanan bir teknolojidir.

Kablosuz iletişim sadece hareketli kullanıcıların erişimini arttırmakla kalmayıp aynı zamanda durağan ofis ve ev cihazlarının kablolu giderlerini de düşürmektedir. Günümüzde her gün daha çok bilgi ve bilgi teknolojilerine ihtiyaç duyulması, hareket esnekliği ihtiyacını da beraberine getirmiştir. Kablosuz yerel alan ağları bu ihtiyaçlara cevap verecek uygulamalardır.

Kablosuz yerel alan ağları ilk olarak 1997’de IEEE tarafından duyurulan 802.11 standardı, 2.400-2.483 MHz frekasında çalışmakta, yerel ağlarda kablosuz Ethernet bağlantılarını olanaklı kılmaktadır. İlk standart 1997’de 802.11 olarak yayınlanmıştı, 90’lı yılların sonunda standart geliştirildi ve bugünkü halini alarak 1999’da 802.11 olarak yayınlanmıştır. Son olarak standart ANSI (American National Standart Institute) ve ISO (International Standart Organization) tarafından da kabul edilmiştir. İlk standartta 1 ve 2 Mbps’lik çalışma hızları belirlenmiştir. İdeal ortamlarda FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) ile 2 Mbps, parazitik etkileri etkin olduğu ortamlarda DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ile 1 Mbps veri iletim oranları sağlanmaktadır [IEEE, 1997].

1999’un sonlarına doğru yayımlanmış olan IEEE 802.11a standardı 5.15-5.35GHz frekans bandında, Dikgensel Frekans Bölüşümlü Çoğullama kullanarak yüksek miktarda bant genişliğine imkan tanımaktadır.

2,4 GHz frekans bandının lisanssız bir frekans bandı olması ve kullanım serbestliği bu frekans üzerindeki çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda 2003 yılında 2.4GHz frekans bandını kullanan ve Dikgensel Frekans Bölüşümlü Çoğullama tekniğini kullanan 802.11g standardı yayımlanmıştır [Villanen, 2003].

## 2.2 Kablosuz Yerel Alan Ağı Standardları

802.11 standardı ilk kablosuz yerel alan ağ standardı olup **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** tarafından 1997 yılında çıkarılmış bir standarttır. 802.11 standardına uygun çıkarılan ilk ürünler Amerika'da ISM (Industry, Science, Medicine) olarak anılan, ülkemizde de lisanssız olarak kullanılabilen bir bant olan 2.4-2.4835 GHz'de çalışmakta ve 1 Mbps'den 2 Mbps'e varan paylaşımlı veri transfer hızına erişebilmektedir.

802.11 2.4-2.4835 Ghz bandında **FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum – Frekans Zıplamalı Yayılı Spektrum)** modülasyon tekniğini kullanmakta ve bu teknik ile 2 Mbps veri iletişim hızına ulaşılabilir [IEEE, 1997]. Günümüzde kullanılmakta olan kablosuz yerel alan ağlarında Dikgensel Frekans Bölüşümlü Çoğullama (OFDM) tekniği kullanılmaktadır ve lisans gerektirmeyen 2.4-2.4835 GHz frekans bandında 54 Mbps hızlarına ulaşılabilir [Villanen, 2003]. Bu bandın çeşitli kısıtlamaları mevcuttur. Bant aralığının sadece 83.5 MHz genişliğinde olması yayılı spektrum tekniğinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. 802.11 kısıtlı bant genişliğine rağmen sağlam ve güvenli bir sistem altyapısı sağlamaktadır. Tüm bant genişliği ve frekans atlama tekniği kullanıldığı için girişim ve parazitten etkilenme olasılığı oldukça azalmaktadır. Aynı kapsama alanında 15 erişim noktası (Access Point) kullanmak mümkündür.

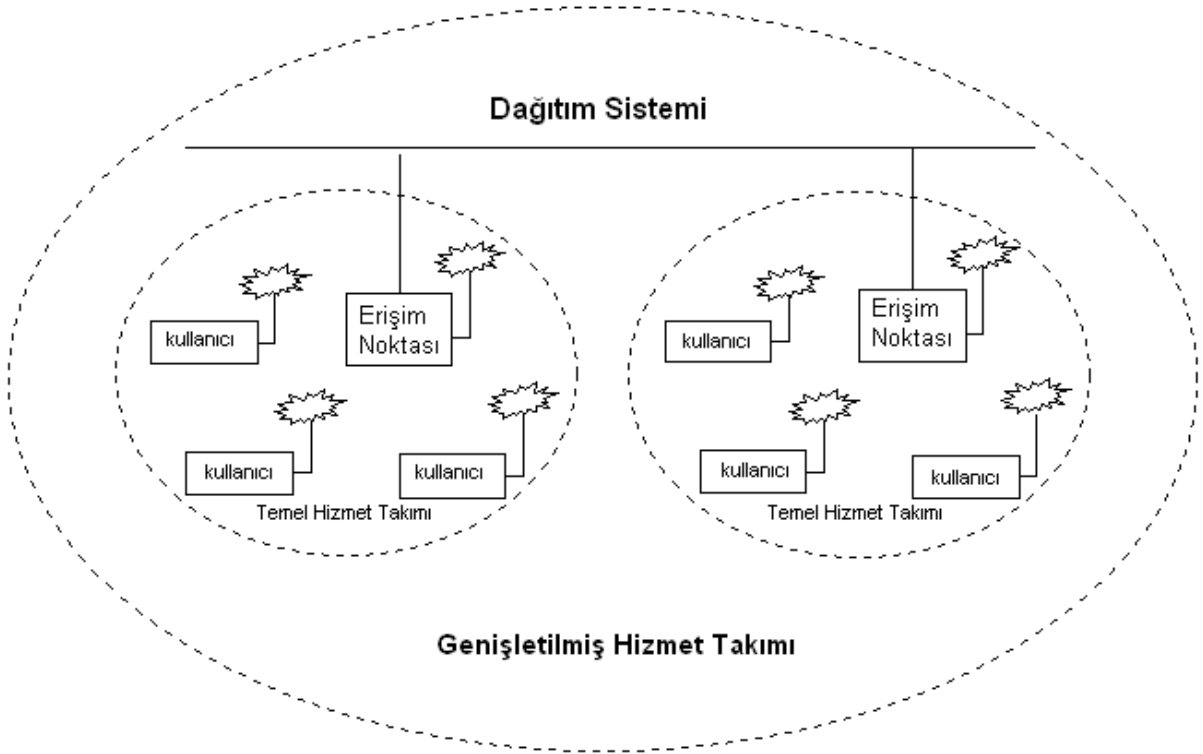
## 2.3 IEEE 802.11 Mimarisi ve Kullanılan Elemanları

Kablosuz yerel alan ağı olan 802.11 standardı hücreli bir mimariye sahiptir. Hücreli olan bu sistem alt hücrelerden oluşmaktadır. Sistem içerisindeki her bir hücre 802.11 terminolojisinde

(Basic Service Set- BSS) Temel Hizmet Takımı olarak adlandırılmaktadır ve her bir hücre (Access Point-AP) tarafından kontrol edilmekte, kablosuz yerel ağ ile kablolu yerel ağ arasında köprü olarak görev yapacak bir Erişim Noktası'na gereksinim duyar.

Erişim noktaları genellikle merkezi bir noktaya yerleştirilmiş durağan elemanlardır ve kablolu ağın bir elemanıymış gibi ele alınır. Günümüzde her eve girmeye başlayan erişim noktaları , hücresel telefonlar ile haberleşen hücresel telefon ağındaki bir kuleye benzetilebilir.

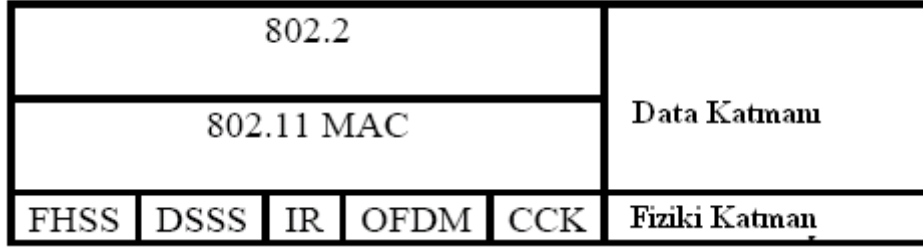
Genellikle kablosuz yerel alan ağı ile yapılan bir ağda aynı omurgaya bağlı farklı erişim noktaları ile oluşturulan hücreler (Extended Service Set-ESS) Genişletilmiş Hizmet Takımı denmektedir. Şekil 2.1'de iki hücreli bir ESS örneği gösterilmektedir.



**Şekil 2.1 İki hücreli kablosuz Ağ [IEEE, 1999]**

## 2.4 IEEE 802.11 Katman Tanımları

IEEE'nin kablosuz yerel ağ standartları olan 802.11 iletim şekli ve iletim ortamını tanımladığı için Open System Interconnection OSI'nin birinci ve ikinci katmanında faaliyet göstermektedir. Modülasyon şekilleri olan frekans atlamalı yayılı spektrum ve doğrudan sıralı yayılı spektrum OSI'nin birinci katmanı ile ilgilidir. Diğer güvenlik ve iletim ile ilgili kısımlar ikinci katmanda işlenir. OSI'nin ilk iki katmanı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 802.11 katman tanımları [IEEE, 1997]

## 2.5 Temel Erişim Yöntemleri / Çarpışmadan Sakınma [Çoklu Erişim Taşıyıcı Algılama (CSMA/CA)]

Çoklu erişim taşıyıcı algılama/Çarpışmadan sakınma (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance-CSMA/CA) bilgisayar ağ sistemlerinde temel erişim metodlarından biridir. CSMA/CA birçok aygıttan aynı andaki iletimden doğan çakışmaları en aza indirgeyen (fakat yok edemeyen) bir "konuşmadan önce dinle" "listen before you talk" metodudur. CSMA/CA katılımcılarının sessizlik periyotlarında konuştuğu, eğer konuşma var ise sustuğu şeklinde geçen bir tele-konferans gibidir. Bu 802.11'i kullanan uçların konuşmak istediklerinde tüm bant genişliğini elde tutmaları anlamına gelir. Kanalda bir iletim varken diğer kullanıcılar bu iletimin tamamlanmasını beklemek durumundadırlar [IEEE, 1997]. Bununla birlikte ağ'a yeni düğümler eklendikçe kanalı elde etmek için çekişme artar, önemli bir zaman konuşmadaki çakışmaları çözmek için harcanır. Bu nedenle bant genişliğinin etkin biçimde kullanımını düşer.

Geleneksel kablolu Ethernetlerin aksine, iletim anında WLAN istasyonları çakışmayı saptayamazlar. Çünkü çarpışma belirleme uygulamasını çalışabilmesi için full duplex bir iletim hattına sahip olmak gerekir.

802.11 bu gibi problemlerin üstesinden gelebilmek için çarpışmadan kurtulma yöntemi ile birlikte birkaç metod uygulanmaktadır. Bunlardan bir tanesi, bir istasyon iletim yapma isteğindedir ve iletim ortamını dinler, eğer iletim ortamı meşgul ise gönderimden vazgeçer eğer iletim ortamı boşsa gönderim için ilk onay verilmiştir. Alıcı istasyon 32 bitlik CRC (Cyclic Redundancy Check- CRC) olarak adlandırılan ve gönderilen veri katarı hesaplanabilen bir sınama katarıdır), paketini kontrol edecek bir tane doğrulama paketi gönderecektir. Veri alıcı tarafında başarılı bir biçimde alındıktan sonra vericiye iletimin başarılı geçtiğini belirten bir ACK mesajı gönderilir. Eğer gönderici ACK mesajını almaz ise alıcı tekrar gönderecektir.

## 2.6 Veri Paketlerinin Parçalanması ve Yeniden Birleştirilmesi

Tipik bir kablolu ağ protokolü birkaç yüz bitlik veri paketleri kullanmaktadır. Kablosuz yerel bir ağda ise birkaç nedenden dolayı büyük paketler yerine, küçük paketler kullanılmaktadır. Küçük paketlerin kullanılma sebepleri;

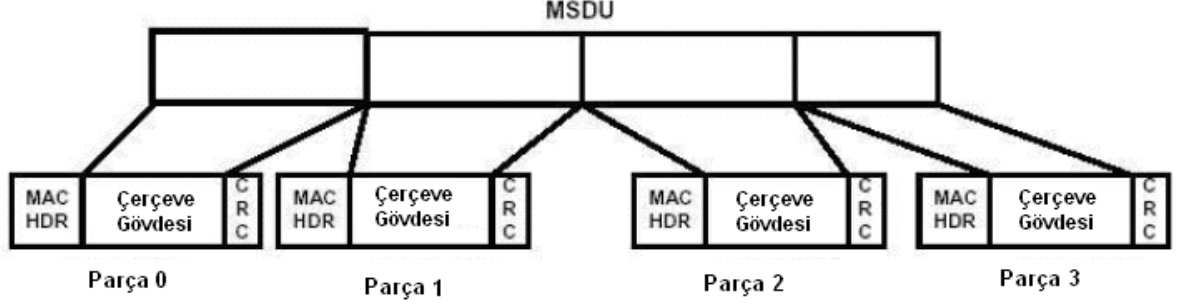
- İletim ortamı olarak havanın kullanılmasından dolayı yüksek bit hata oranının olması, büyük veri paketlerin bozulma olasılığının yüksek olmasına neden olmaktadır.
- Paketlerdeki bozulmadan dolayı, en küçük paketlerin kullanılması gönderim işlemine daha az yük getirmektedir.
- Frekans zıplamalı sistemde, iletim ortamı belirli (20ms civarında) aralıklar ile kesilir, bu yüzden küçük paketlerin iletim ortamında ertelenerek gitmesi en ideal olanıdır.

Veri paketlerinin parçalanmasında ve yeniden birleştirilmesinin basit bir mekanizması vardır. Bu algoritmanın çalışma mantığı Gönder ve Bekle (Send and Wait) dir. Verici Aşağıdaki işlemler gerçekleşmeden yeni veri göndermez.

- Alıcı ACK mesajını göndermeden

- Karşı tarafın gönderme karar verme zamanı için çok fazla süre geçti ise

Şekil 2.3'te bölümlere ayrılmış bir verini genel görünümü verilmiştir.



**Şekil 2.3 Veri paketi [IEEE, 1999]**

## 2.7 Çerçeve Tipleri

Vericiden gönderilen bir çerçeve formatını üç ana başlık altında toplayabiliriz.

- Veri çerçeveleri; Veri iletiminde kullanılan çerçevelerdir.
- Kontrol çerçeveleri; İletim ortamına girişleri denetleyen çerçevelerdir.(RTS, CTS, ACK)
- Yönetim çerçeveleri; İletilmiş çerçevelerdeki bilgi yönetimi ve değişimi kontrol eden çerçevelerdir.

Bir çerçeve tipi belirleyici fonksiyonlarına göre Şekil 2.4'de gösterildiği gibi kendi içinde alt paydalara bölünmüştür.

|           |          |            |     |
|-----------|----------|------------|-----|
| Başlangıç | PLCP Eki | MAC Verisi | CRC |
|-----------|----------|------------|-----|

**Şekil 2.4 Çerçeve yapısı [IEEE, 1999]**

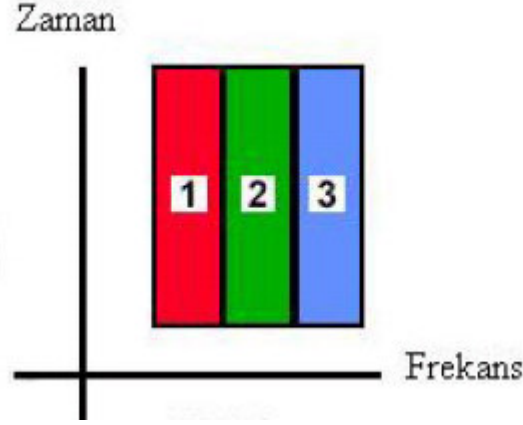
## 2.8 Çoğullama ve oklu Erişim

Çoğullama (Multiplexing) ve "oklu Erişim" (Multiple Access), sabit haberleşme kaynaklarının/ortamlarının paylaşılarak kullanılmasıdır. Çoğullama, kullanıcı ihtiyaçlarının sabit olduğu ve paylaşımın önceden belirlenmiş kurallara göre gerçekleştiği ve genelde yerel bir noktada yapılan haberleşme kaynak paylaşımıdır. Çoklu Erişim, genelde haberleşme kaynaklarının uzaktan paylaşımını gerektirmektedir, örneğin uydu haberleşmesinde ve GSM sistemlerinde olduğu gibi, haberleşme kaynakları dinamik olarak her kullanıcının anlık ihtiyaına göre belirlenmektedir.

Çoğullama ve oklu Erişimin mantığı aynıdır, amaç birden fazla işaretin haberleşme kanalını kullanmasıdır. Tek kanaldan birden fazla gönderilirken işaretlerin karışmasının önlenmesi ve alıcıda istenen işaretin tekrar ayrıştırılabilmesi önem kazanmaktadır.

### 2.8.1 Frekans Bölüşümlü oğullama ve oklu Erişim

Frekans Bölüşümlü oğullama (Frequency Division Multiplexing , FDM) ve Frekans Bölüşümlü oklu Erişim (Frequency Division Multiple Access, FDMA) haberleşme kanallarının frekans paylaşımını öngörmektedir. Her işaretin iletimi için farklı bir frekans bandı kullanılarak işaretlerin birbirine karışması önlenirken birden fazla işaretin aynı kanaldan iletilmesi mümkün kılınmaktadır. şekil 2.5’de bir haberleşme kaynağının frekans-zaman uzayı ile gösterilmiştir. Frekans spektrumu belirli sayıdaki frekans bandına bölünerek, kullanıcıların iletim ihtiyaına göre frekans bantları atanmaktadır. Frekans bantları kullanıcı ihtiyaına göre genelde uzun süreli veya kalıcı olarak ayrılmaktadır.



**Şekil 2.5 FDMA [IEEE, 1999]**

Bilgi işareti bir temelbant işareti ise, taşıyıcı frekansı iletim yapılacak frekans bandına göre belirlenen bir geçişbant modülasyonu kullanılarak işaretlerin FDM ile çoğullanması sağlanabilir. FDM genelde analog işaretlerin çoğullanmasında kullanılmaktadır. FDM ile çoğullanacak işaretlerin bantgenişliği, mutlaka sınırlı olmalıdır, bu nedenle örneklenmiş bir işaretin FDM ile çoğullanması mümkün değildir. Sayısal bir işaret ancak geçişbant modülasyonu ile sürekli bir dalga biçimine dönüştürülüp frekans bandı sınırlandırıldıktan sonra FDM ile çoğullanabilmektedir.

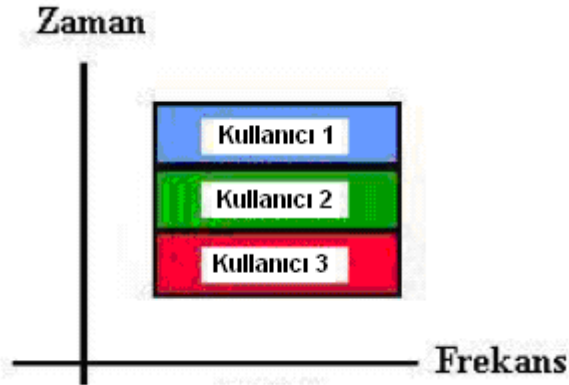
Analog işaretlerin FDM ile çoğullanması işleminde tek-yan-bant modülasyonu (single-side band modulation, SSB) etkin bir çözüm sunmaktadır. Taşıyıcı frekansına modüle edilmiş işaretin bir yan bandının bant-geçiren süzgeç ile alınıp diğer yan bandının atılmasından sonra frekans spektrumu açısından verimli bir iletim sağlanabilmektedir. Frekans bölmeli çoğullamada her alıcını kendisine gönderilen işaretin hangi frekans bandından geleceğini bilmesi gerekir ve her alıcının bir band-geçiren süzgeç ile ilgilendiği işareti diğer işaretlerden ayırıştırması gerekmektedir. Bu nedenle eğer frekans bantları geçici bir süreyle tahsis ediliyorsa haberleşme bağlantısının kurulum aşamasında göndericiye ve alıcıya iletim için tahsis edilen frekans bandı bildirilmektedir.

FDM ve FDMA ile çoğullama yapılırken dikkat edilmesi gereken husus frekans bantlarının (taşıyıcı modülasyon frekanslarının) işaretler arasında karışmaya neden olmayacak şekilde ayarlanmasıdır. Bu nedenle iki komşu modülasyon frekansı arası en az çoğullanan işaretlerin bantgenişliği kadar tutulmalıdır, hatta ayırıştırma için ideal olmayan süzgeçlerin kullanılacağı göz önüne alınarak iki frekans band arasında bir güvenlik bandı bırakılmalıdır.

### 2.8.2 Zaman Bölüşümlü Çoğullama ve Çoklu Erişim

Zaman bölüşümlü çoğullama (Time Division Multiplexing, TDM) ve Zaman bölüşümlü çoklu erişim (Time Division Multiple Access, TDMA) sayısal işaretlerde örnek arası zaman aralığının diğer işaretlerin örnekleri için kullanılarak bir haberleşme kaynağının zaman bazlı bir paylaşım sonucu ortak kullanılmasını sağlamaktadır.

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi zaman uzayı belirli uzunluktaki zaman dilimlerine (time-slot) bölünerek her bir sayısal işaretin örnekleri için farklı bir zaman diliminin kullanılması sonucu haberleşme kaynağının ortak kullanımı sağlanırken işaretlerin karışması önlenmektedir. TDM ve TDMA’de frekans bandında ise bir çoğullama yapılmamakta, her işaret için mevcut frekans spektrumunun tamamı kullanıma sunulmaktadır. Ardışık iki işaret için ayrılan zaman dilimleri arasında olası ufak senkronizasyon hatalarına karşı güvenlik bantları bırakılabilmektedir.



Şekil 2.6 TDMA [IEEE, 1999]

İşaretlerin TDM/TDMA ile çoğullanması sırasında dikkat edilmesi gereken husus zaman uzayında bir çakışma olmaması için işaretlerin örnekleme frekanslarının birbirine eşit veya birbirinin tamsayı katı olması gerektiğidir. İşaretlerin çoğullanma zamanları arasında, sistemin zamanlamasında meydana gelebilecek ufak hatalara karşı bir güvenlik bandı bırakılmasında fayda vardır. Her alıcının kendisine gönderilmiş olan işaretin hangi zaman diliminde geleceğini bilmesi gerektiğinden haberleşme bağlantısının kurulu aşamasına gönderici ve alıcı arasında zamanlama senkronizasyonu kurulmakta, yani gönderici ve alıcıya hangi zaman diliminin onların kullanımına tahsis edildiği bildirilmektedir.

### 2.8.3 Kod Bölüşümlü Çoğullama ve Çoklu Erişim

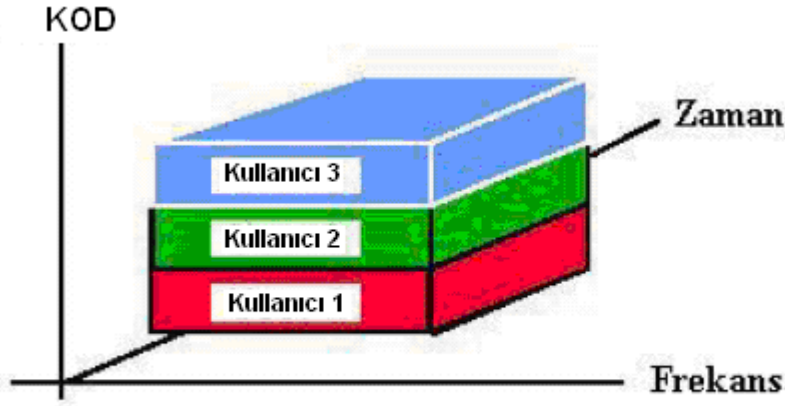
Kod bölüşümlü çoğullama (Code Division Multiplexing, CDM) ve kod bölüşümlü çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) FDM ve TDM'in (FDMA ve TDMA'nın) karılmasından elde edilen bir çoğullama yöntemidir. Esasında hem frekans uzayı hem de zaman uzayı bölüşümü söz konusu değildir çünkü zaman uzayının bölüşülebileceği örneklenmiş sayısal işaretlerin frekans spektrumu sınırsızdır ve frekans uzayı bölüşümü yapılamaz, frekans spektrumları sınırlı olan sürekli-zaman işaretleri ise zamanda sürekli oldukları için zaman bölüşümü yapılamaz. Kod bölüşümlü çoğullamanın temelinde frekans uzayının bölüşümlü olarak kullanılması yatmaktadır, frekans bantları kullanıcılara belirli bir süre için ayrılmakta ve bu süre sonunda frekans bant paylaşımı yeniden düzenlenmektedir. Belirlenen zaman aralığı boyunca kullanıcılar kendilerine ayrılan bantlardan iletim yapmakta, bu süre sonunda iletme devam eden kullanıcılar yeni paylaşıma göre yayın bantlarını değiştirmekte, iletimi biten kullanıcıların yerine iletim yapmak isteyen yeni kullanıcıların alınması sonucu haberleşme kaynakları etkin bir şekilde değerlendirilmiş olmaktadır.

Şekil 2.7'de örnek bir CDMA sistemi için frekans-zaman uzayının kullanımı gösterilmektedir. Birinci zaman aralığında birinci kullanıcı birinci frekans bandını, ikinci kullanıcı ikinci bandı, üçüncü kullanıcı da üçüncü bandı kullanmaktadır. Birinci zaman aralığı sonunda frekans spektrumunun paylaşımı yeniden düzenlenmekte ve ikinci zaman aralığında birinci kullanıcı üçüncü banttan, ikinci kullanıcı birinci banttan ve üçüncü kullanıcı da ikinci banttan iletme devam eder. İkinci zaman aralığının sonunda frekans paylaşımı tekrar düzenlenmektedir.

İletilen işaretlerin belirli zaman aralıklarında farklı frekans bantlarına geçerek iletimin gerçekleştirilmesi "frekans zıplaması" (frequency hopping) olarak adlandırılmaktadır. Haberleşme bağlantısı kurulurken her kullanıcı için verilen bir sözde gürültü (pseudonoise PN) kodu ile kullanıcının hangi zaman aralığında hangi frekans bandından yayın yapacağı belirlenmektedir. Gönderici ve alıcı senkronizasyonu için PN kodu bağlantı kurulurken hem gönderici hem de alıcıya bildirilmektedir. Her iletim için ayrı olarak belirlenen PN koduna göre her seferinde farklı bir frekans bandı atlaması gerçekleştiği için, CDM özellikle güvenlik açısından FDM ve TDM yöntemlerine tercih edilmektedir. PN kodlarının belirlenmesinde özel fonksiyonlar kullanılmakta ve bu fonksiyonlar sayesinde dikgensel olarak ayarlanan PN kodları ile aynı anda birden fazla işaretin aynı frekans bandından iletimi engellenmektedir.

Kod bölüşümlü çoğullamanın bir diğer faydası, iletim süresi boyunca her kullanıcı frekans bantları arasında atladığı için, çevre koşulları yüzünden iletişim kalitesinin kötü olduğu frekanslar mevcut olsa dahi, kullanıcı bu frekanslarda uzun süre kalmayacağından iletişim kalitesinde düşüş geçici olacaktır.

Frekans atlaması gerçekleştirilirken, işaret kendi bantgenişliğinden daha geniş bir bantı iletim için kullanmaktadır, iletim esnasında işaretin frekans bandını genişleten (yayan) yöntemlerin tamamına literatürde yayılı-spektrum (spread-spectrum, SS) yöntemleri denmektedir ve kablosuz yerel ağ (WLAN) teknolojilerinde yoğun olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 CDMA [IEEE, 1999]

## 2.9 Kullanılan Modülasyon Tekniği

Dış dünyadaki değişimler veya diğer sinyallerin yarattığı girişimler, taşınan sinyalin bozulmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra iletim ortamının getirdiği bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Bu nedenle, sinyalin mümkün olduğunca az bozulması için sinyal üzerinde bazı işlemler gerçekleştirilmektedir. Çok alçak frekanslı sinyallerin (örneğin ses) çok uzak mesafelere gönderilmesi güçtür. Bu nedenle alçak frekanslı sinyalin, yüksek frekanslı taşıyıcı bir sinyal üzerine bindirilerek uzak mesafelere taşınması sağlanabilir. Bu olaya modülasyon denir. Analog ve sayısal sinyallerin modülasyonunda farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bir sinyalin istenilen yapıda olmasını belirleyen önemli bir kriter, sinyalin frekansıdır. Örneğin

bir ses sinyali 1000 Hz'in altındaki bileşenlerden oluşmaktadır. Ancak modülasyon sinyalin istenen frekansta taşınmasını sağladığından, etkin bir iletişim sağlamaktadır. Bir sinyalin taşıyabileceği bilgi miktarını sinyalin frekans aralığı belirlemektedir. Örneğin 5 GHz'lik frekansa sahip bir iletim sistemi, 500 KHz'lik bir iletim sisteminden on bin kat fazla bilgi taşıyabilmektedir. Daha yüksek frekansa sahip bir lazer ışını ise on milyon televizyon kanalının gerçekleştirebileceği taşıma potansiyeline sahiptir. Ancak yüksek frekanslarda bilgi taşıma daha yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Kablosuz yerel ağ teknolojisi olan IEEE 802.11 standardlarında Frekans Atlamalı Yayılı Spektrum, Doğrudan sıralı yayılı spektrum ve Dikgensel Frekans Bölüşümlü çoğullama modülasyonları kullanılmaktadır.

### **2.9.1 IEEE 802.11b Standardında Kullanılan Modülasyon Yöntemi**

IEEE 802.11b standardı Eylül 1999 yılında standard haline getirilmiştir. 802.11b kablosuz yerel ağ standardıda 802.11'de ki endüstri bilim sağlık (ISM) olarak adlandırılan lisanssız olarak kullanılan frekans bandını kullanmaktadır. Bu frekans bandı 2.4GHz ile 2.4835GHz frekans aralığını kapsamaktadır. Yine aynı şekilde 802.11 ile 83.5MHz'lik bant genişliğine sahiptir.

IEEE 802.11b'nin geliştirilmesindeki amaç kablosuz yerel ağ teknolojilerinde ki veri iletiminin girişimden daha az etkilenmesi, güvenliğin daha arttırılması ve en önemli özelliklerden birisi olan veri iletim hızının 11Mbps'a çıkarılması kablosuz yerel ağ teknolojilerinde o dönem için önemli bir adımdır.

802.11 standardıda Yayılı Spektrum teknolojisini ve sayısal taşıyıcı modülasyonunu kullanmaktadır. 802.11'den farklı olarak 802.11b'de Frekans Atlamalı Yayılı Spektrum yerine Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum-DSSS) tekniğini kullanır. Sayısal taşıyıcı modülasyonunda ise Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Quadrature Shift Keying) modülasyonunu kullanmaktadır.

802.11b DSSS ile birlikte 1 Mbps için DBSK (Differential Binary Phase Shift Keying) ve 2 Mbps için DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) kodlama yöntemleri kullanılmaktadır.

Daha yüksek veri oranları olan 5.5 ve 11 Mbps için ise CCK (Complementary Code Keying) kullanılmaktadır. Tüm bu farklı modülasyon teknikleri, 802.11'de tanımlı oran anahtarlama işlemleri ile aynı ortamda, aynı anda kullanılabilir.

### Farksal Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DQPSK)

DQPSK (Differansial Quadrature Phase Shift Keying) A genliğinde dörtlü faz kaydırmalı anahtar olarak düşünebileceği gibi,  $A\sqrt{2}$  genliklerinde  $\cos(2\pi fct)$  ve  $\sin(2\pi fct)$  taşıyıcıları kullanan iki adet ikili genlik kaydırmalı anahtarlama işaretinin süperpozisyonu olarak ta düşünülebilir. Dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama dört adet taşıyıcı kullanıldığı için ikili sisteme göre sayısal işaretlerin bitleri ikiyeşerli olarak gruplandırılmış olarak ele alınabilir.

DQPSK iletimi için kullanılacak dört adet taşıyıcı;

$$\cos(w_c t + \pi/4) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos w_c t - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin w_c t \quad 00$$

$$\cos(w_c t + 3\pi/4) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos w_c t - \frac{1}{\sqrt{2}} \sin w_c t \quad 01$$

$$\cos(w_c t + 5\pi/4) = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cos w_c t + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin w_c t \quad 10$$

$$\cos(w_c t + 7\pi/4) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos w_c t + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin w_c t \quad 11$$

| Dibit Pattern (d0,d1) d0 zamanda ilk | Faz değişimi (+jw) |
|--------------------------------------|--------------------|
| 00                                   | 0                  |
| 01                                   | $\pi/2$            |
| 11                                   | $\pi$              |
| 10                                   | $3\pi/2$           |

**Tablo 2.1 Taşıyıcı/Faz değişimi**

IEEE 802.11b standardında Farksal Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama kullanıldığı takdirde 5,5Mbps veri iletim hızı elde edilebilmektedir.

## **Tamamlayıcı Kod Anahtarlama**

Tamamlayıcı Kod Anahtarlama (Complementary Code Keying-CCK) IEEE 802.11 standardı için geliştirilmiş veri hızını, kodlama şekline göre 5,5Mbps 11Mbps'a ulaştıran bir uygulamadır. Tamamlayıcı Kod Anahtarlama girişim ve sinyal gürültü oranına karşı oldukça etkilidir.

Tamamlayıcı Kod Anahtarlama uygulamasının çalışma prensibi; Gönderilecek olan veri bitleri iletilecek olan 8 parçalı sembole kodlanır. Tamamlayıcı Kod Anahtarlama uygulamasında iki veri iletim hızında gönderim yapılmaktadır.

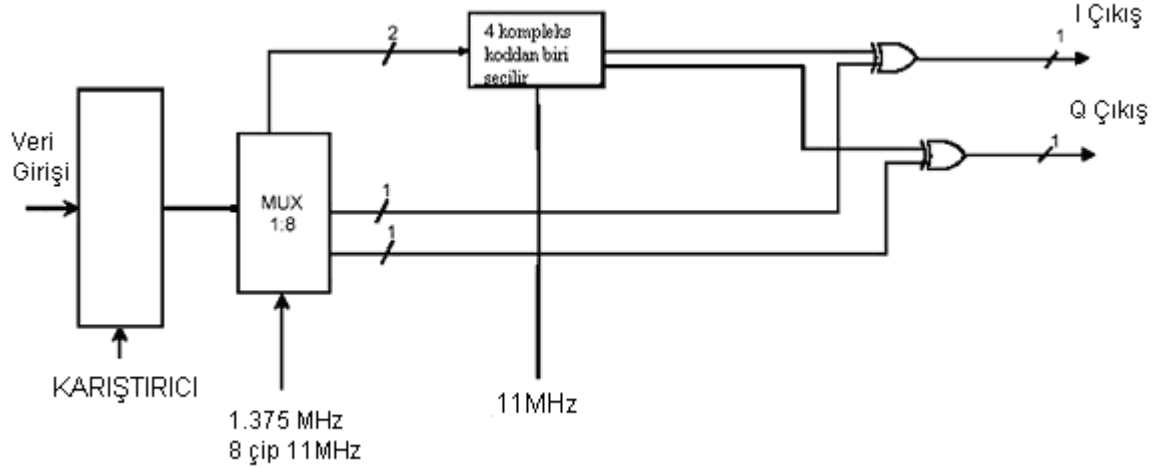
Bunlardan düşük iletim hızı olan 5,5Mbps için kodlama tekniği;

- İki veri biti , Eşfazlı (in-phase channel-I) veya Dikfazlı (Quadrature Channel-Q) kanala kodlanır.
- İki veri bitinin eşlenmesi dört kompleks kod kelimesinden birine eşleştirilir.

Tamamlayıcı Kod Anahtarlama uygulamasında 11Mbps veri iletim hızında gönderim yapabilmek için;

- 5.5 Mbps iletim hızında olduğu gibi İki veri biti , Eşfazlı (in-phase channel-I) veya Dikfazlı (Quadrature Channel-Q) kanala kodlanır.
- Altı veri biti 64 kompleks kod kelimesinden birine eşleştirilir.

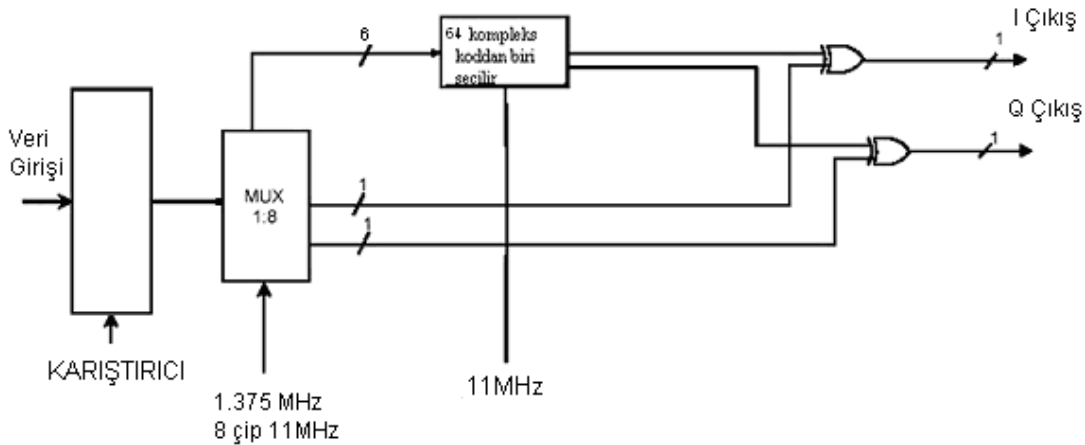
IEEE 802.11b standartında kullanılan Tamamlayıcı Kod Anahtarlama uygulamasında 5.5Mbps veri iletim hızının iki veri biti dört parçalı kompleks kod kelimesine eşlendikten sonra iletim şeması ve I ve Q kanallarının seçilmesi şekil 2.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.8 5.5 Mbps veri iletimi [IEEE, 1999]**

Veri oranı=4 bit/sembol \* 1.375 MSps = 5.5 Mbps

11Mbps veri iletim hızı içinse Tamamlayıcı Kod Anahtarlama uygulamasında 11Mbps veri iletim hızının iki veri biti sekiz parçalı kompleks kod kelimesine eşlendikten sonra iletim şeması ve I ve Q kanallarının seçilmesi Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



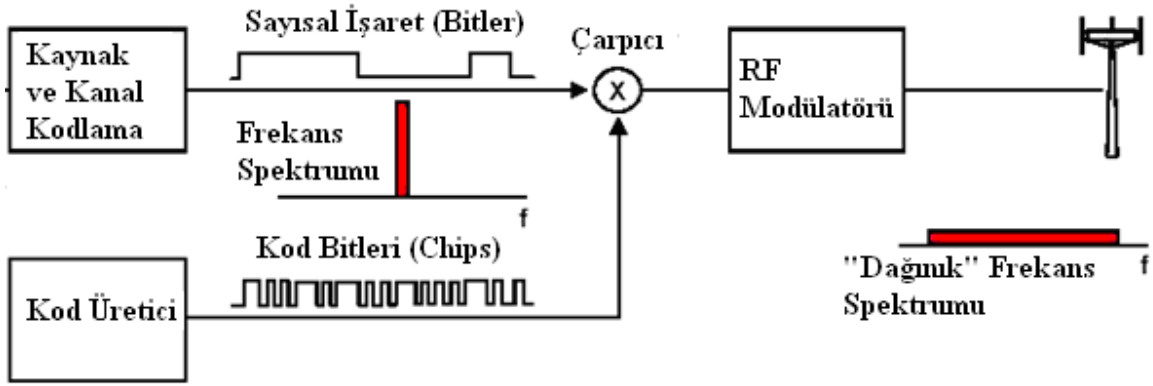
**Şekil 2.9 11 Mbps veri iletimi [IEEE, 1999]**

Veri oranı = 8 bit/sembol \* 1.375 MSps = 11 Mbps

11Mbps veya 5.5Mbps iletim hızlarında çoğullayıcıdan kod seçme işlemi yapan bölümün çalışma mantığı; Tamamlayıcı kod Anahtarlama uygulaması, Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlamaı beraber kullandığı için 4 adet farklı fazlarda taşıyıcı mevcuttur.

## Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (DSSS)

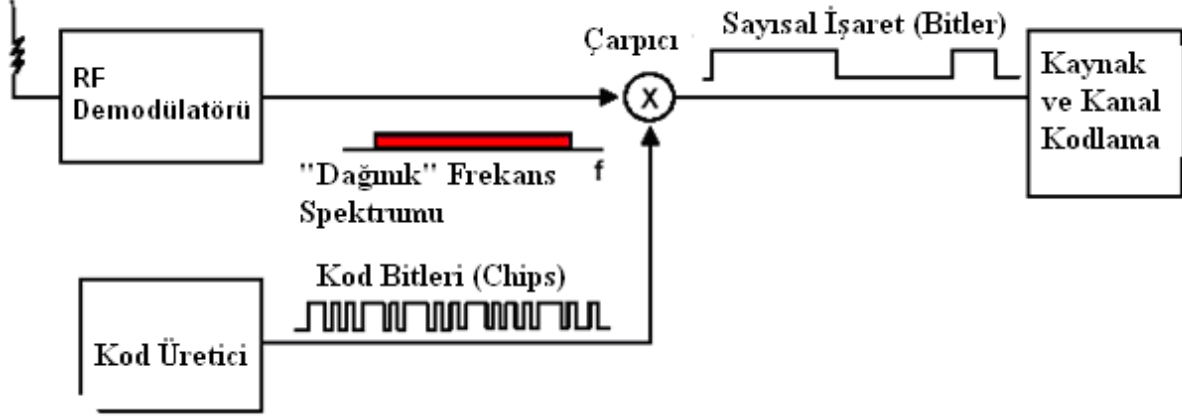
Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum) en fazla bilinen ve en geniş kullanım alanına sahip yayılı spectrum sistemlerinden biridir. DSSS, modüle edilip iletme uygun hale getirilmiş işaretin, pseudo-noise (PN) adı verilen sayısal sinyalle çarpılması ile gerçekleştirilir. Buna ikinci bir modülasyon da diyebiliriz. Bu işlem RF sinyalinin geniş bir bant aralığına oturtulmasını sağlar. Geniş bant aralığına yayılmış olan sinyal bir verici ile iletilir ve alınan sinyal benzer işlemlerle bilgi haline çevrilir. DSSS'in genel yapısı Şekil 2.10'daki blok diyagramda gösterilmiştir.



**Şekil 2.10 DSSS blok diyagramı [IEEE, 1999]**

Şekil 2.10'da ilk önce kaynak ve kanal kodlama işlemi yapılmakta daha sonra sayısal işaretin her biti rasgele üretilmiş PN (Pseudo-noise) veya Chips Kodu ile Ex-OR işlemine tabi tutulmaktadır.

Sistemi daha iyi anlayabilmek için temel bantta iletim yapıldığını varsayalım, Bilgi sinyalinin zaman eksenindeki karşılığı  $R(t)$ , PN kodununki de  $C(t)$  olsun. Modülasyon iki sinyalin zaman ekseninde çarpımı, frekans ekseninde ise konvolüsyonu anlamına gelmektedir. Zaman ekseninde tanımlı bir sinyali frekans eksenine Fourier transformunu alarak çevirebiliriz. Dar bantlı bir sinyalle geniş bantlı bir sinyal çarpılırsa sonuç, geniş bantlı sinyalin bant aralığına yakın bir sinyal olur. Bu tanıma göre PN kodu geniş bantlı sinyal rolü oynamaktadır. Sinyalimiz PN kod ile modüle edilince  $K(t) = R(t) \cdot C(t)$  sinyali elde edilir. Bu sinyal güçlendirilip, bir anten ile iletilir.



Şekil 2.11 İşaretin alınması [IEEE, 1999]

İletim esnasında bu sinyalde çeşitli nedenlerden dolayı parazitlenme olur. Bu parazitlenmeyi  $I(t)$  ile gösterirsek alıcı tarafından algılanan sinyal  $A(t)=K(t)+I(t)$  olur. Şekil 2.11’de işaretin alınmasıyla ilgili diyagram gösterilmektedir. DSSS’e uygun bir alıcı, gelen sinyali göndermekte kullanılan PN kodun aynısı ile çarparak  $Z(t)=C(t)^2.R(t)+C(t).I(t)$  sinyalini elde eder. PN kodu -1 ve +1 seviyeleri arasında değişen bir sinyal olduğu için bu sinyalin karesi daima birdir ( $C(t)^2=1$ ). Böylece alıcıda elde edilen sinyal, bilginin kendisi ve parazitin PN kodu ile çarpımından oluşur. Bilindiği gibi parazitin geniş bantlı PN kodu ile çarpımı yine geniş bantlı bir sinyaldir. Orijinal sinyal ise dar bantlıdır. Bu olaylar temelbantta gerçekleştiği için parazitin büyük bir bölümü alçak frekans filtresi (LPF) ile süzülebilir. Görüldüğü gibi parazite karşı koruma DSSS’in doğal yapısında vardır. Modülasyon ve demodülasyon işlemleri ile DSSS işlemi lineer olduğu için bu işlemler yapılmadan veya yapıldıktan sonra uygulanabilirler. Bu tamamen sistem dizaynına bağlı bir olaydır. DSSS performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de, parazitli ortamlardaki işlem kazancıdır (PG). PG sinyal bant-genişliğinin mesajın bant-genişliğine oranı olarak tanımlanır. DSSS sistemleri parazitlerin etkilerini azaltacak bir yapıya sahiptir. Girişim PG ile ters orantılı olduğundan, kasıtlı ve kasıtsız parazitlere karşı durabilmek için PN kodunun uzunluğu artırılmalıdır. Aynen parazitlere karşı olduğu gibi, engellemelere karşı koruma da, yüksek işlem kazancı ve gücün bant aralığına düzenli ve alçak seviyede dağıtılması ile oluşturulan tahmin edilemeyen taşıyıcı sinyaller sayesinde sağlanır. Kriptografik özellikler, data modülasyonunun taşıyıcı modülasyonundan ayırt edilememesi ve taşıyıcı modülasyonunun yabancılara tamamen rastlantısal gösterilmesi ile sağlanır. Ayırt edilemeyen data ve taşıyıcı modülasyonu içeren bir sistem de gizlilik sağlar. Alıcı ve verici, bağımsız taşıyıcılarla çalışıyorlarsa ufak bir girişimle aynı bant aralığında işlem yapabilirler. Bu sistemlere Code Division Multiple Access

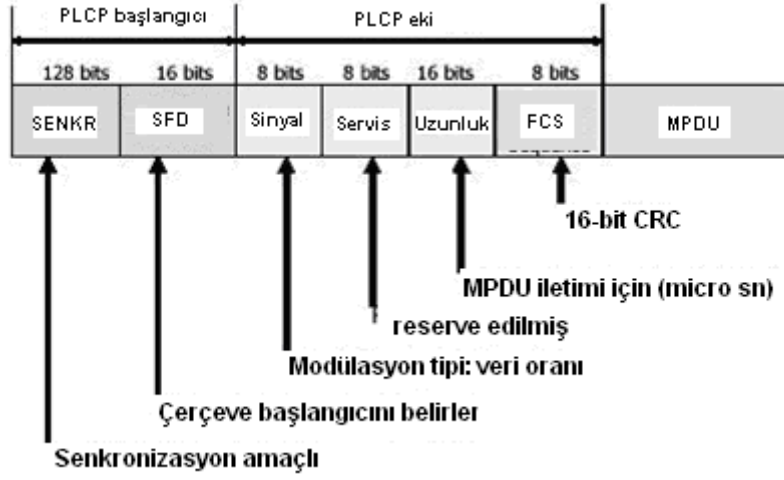
(CDMA) adı verilir. DSSS teknolojisi ile gelişen CDMA, sayısal telsiz ağların kapasitesini yükselttiği gibi daha güvenli sistemlerin oluşturulmasını sağlar. CDMA kullanımında her kullanıcıya ayrı bir PN (Pseudo-noise) kodu tahsis edilir ve böylece iletişimde gizlilik sağlanır. Bu sistemler aynı bant aralığındaki parazit ve engellemelerden etkilenmedikleri gibi normal yayın yapan istasyonları da ne etkilerler ne de onlardan etkilenirler. Böylece DSSS destekli CDMA sistemlerinde spektral verimlilik sağlanabilir. Bu normal sistemlerle elde edilemeyecek bir özelliktir.

### **Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrumun Çerçeve Formatı**

Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum teknolojisinde, bir Fiziksel Katman Yakınsama Metodunda (Physical Layer Convergence Procedure PLCP ) çerçevesi 176 bitten oluşmaktadır. PLCP katmanı OSI'nin birinci ve ikinci katmanı arasında bir alt katman olarak tanımlanabilmektedir.

144 bitlik kısım çerçevenin başlangıç kısmını oluşturmaktadır. İlk 128 bit senkronizasyon amaçlı kullanılmaktadır. Sonraki 16 bir ise çerçevedeki verinin başlangıcını ve bitişini belirtmek amacı ile kullanılmaktadır. Verinin başlangıcını ve bitişini içeren bu kısım 802.11 haberleşmesinde çok önemlidir. Bu veri iletim ortamındaki bütün kullanıcılara iletildiği için bu süre zarfında başka kullanıcılar kanala iletim yapmaya çalışmayacaktır. Bu sayede çarpışma (collision) olasılığı azaltılır ve kanalda veri iletim kontrol paketleri (RTS-CTS-ACK) iletimleri minimuma indirilmiş olur.

PLCP başlangıç çerçevesinden sonra gelen 40 bitlik çerçeve sayfası 3'e bölünmüştür. İlk 8 işaretin modülasyon tipi ve veri oranını belirtmekte sonraki 8 bit hizmet amaçlı, 16 bitlik kısım iletilecek bilginin MPDU'sunu son 8 bit ise hata kontrol bitleridir.



Şekil 2.12 DSSS PLCP çerçeve yapısı [IEEE, 1999]

### 2.9.2 IEEE 802.11a ve IEEE 802.11g Standardlarında Kullanılan Modülasyonlar

IEEE 802.11a/g standartları, 802.11 ve 802.11b standardına göre çok hızlı veri oranına sahiptir. 802.11a'nın 802.11g ve 802.11b'den en büyük farkı 2.4 GHz ISM bandında değil, Amerika'da U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure) olarak anılan 5 GHz bandında çalışmasıdır. Artan frekans ile sistemin kullanılabilir bant genişliği 300MHz'dir (802.11b/g'de bu değer 83.5MHz idi). 802.11b'ye göre önemli bir fark da 802.11a ve 802.11g'nin Yayılı Spektrum modülasyon tekniğini değil, Dikey Frekans Bölüşümlü Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) tekniğini kullanmasıdır. 802.11a ve 802.11g standartları aşağıdaki modülasyon yöntemlerini kullanarak çeşitli veri hızlarında iletim yapılmaktadır.

- BPSK ile (6Mbps, 9Mbps)
- QPSK ile (12Mbps, 18Mbps)
- 16-QAM ile (24Mbps, 36Mbps)
- 64-QAM ile (48Mbps, 54Mbps)

802.11g'de 2.4'ten 2.4835 frekans bandında eşzamanlı operasyon için birbiri ile örtüşme yapmayan 3 kanal (frekans) mevcuttur. Bu aralıkta belirlenen 13 (bazı ülkeler için 11) merkez kanal (frekans) vardır, 2.412, 2.417, 2.422, 2.427, 2.432, 2.437, 2.442, 2.447, 2.452, 2.462

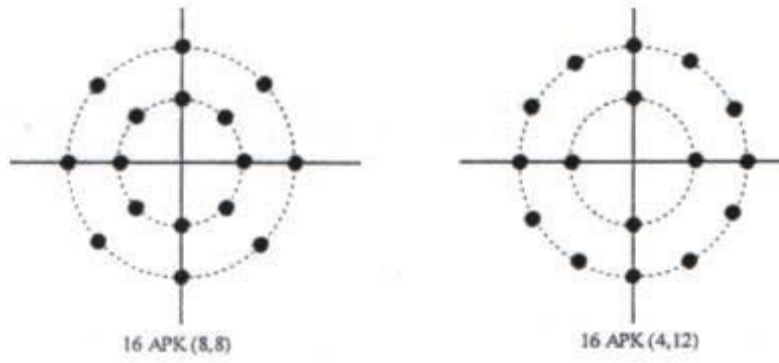
2.467 ve 2.472 GHz. Ancak aktif kanallar arasında 25 Mhz boşluk gerekli olduğu için genellikle 3 kanal eşzamanlı olarak kullanılabilir, daha fazla kanal kullanıldığı zaman parazit ve girişim olasılığı yüksektir.

Daha fazla bant genişliğine olanak veren bir olgu da, 802.11a'da daha fazla iletişim kanalının bulunmasıdır. 802.11a'da ise 5 GHz spectrumunun Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan iki alt bandında (5.15-5.25 ve 5.25-5.35 GHz) eşzamanlı operasyon için 8 kanal mevcuttur. Her biri 20 Mhz genişliğinde olan ve 52 adet taşıyıcı sinyal destekleyebilen bu 8 kanalın merkez noktaları 5.18, 5.2, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30 ve 5.32 GHz'dir. Varolan kanallardan bağımsız olarak 802.11a herhangi tek bir kanalı herhangi bir zamanda kullanabilir. Ve eğer birden fazla erişim noktası varsa çok daha fazla sayıda eşzamanlı kullanıcıyı destekleyebilirsiniz.

IEEE 802.11a ve IEEE 802.11g standartlarının yüksek veri hızında iletim yapması ,Genlik Faz Anahtarlama (QAM) ve Dikey Frekans Bölüşümlü Çokullama (OFDM) uygulamaları ile olmaktadır.

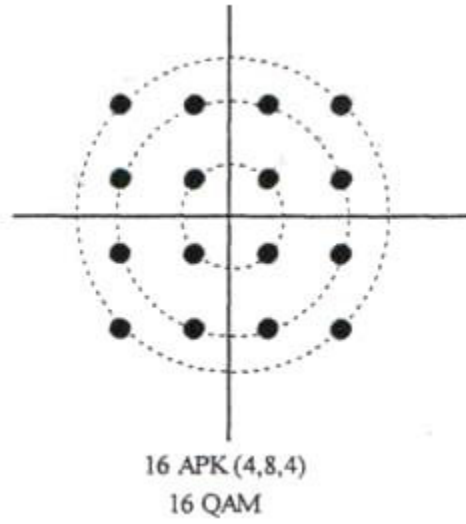
### **Genlik Faz Anahtarlama Modülasyonu**

Özellikle kablosuz haberleşme sistemleri için frekans spektrumu kısıtlı ve arttırılamayan bir haberleşme kaynağı olduğu için bant genişliği bakımından verimli modülasyonların kullanılması ön plana çıkmaktadır. M-li PSK ile iletim için kullanılan bant genişliği azaltılabilmekte beraber bir noktadan sonra taşıyıcılar arasındaki faz aralığının çok küçük olmasından dolayı hata olasılığı aşırı artmakta ve taşıyıcı sayısı daha fazla arttırılamamaktadır. Taşıyıcının fazı ile genliğinin beraber modüle edildiği iletim sistemlerin genlik-faz anahtarlama sistemler (Amplitude-Phase Keying, APK) denmektedir. Taşıyıcının fazı ile beraber genliğinin de modüle edilmesi sonucu taşıyıcı sayısı arttırıldığında fazör uzayının etkili bir biçimde kullanılması sonucu MPSK'da rastlanan taşıyıcılar arası faz aralığının küçülmesi sonucu oluşan sınırlama aşılmaktadır. Aşağıdaki şekil 2.11'de 16 taşıyıcılı örnek APK fazör diyagramları gösterilmiştir. Kullanılan genlik seviyesi sayısına göre ve her genlik seviyesine yerleştirilen taşıyıcı sayısına göre belirli sayıdaki taşıyıcı farklı şekillerde yerleştirilebileceği için parantez içerisinde veya doğrudan sistem adlandırılırken her genlik seviyesinde kaç taşıyıcı olduğu belirtilmektedir (16 APK (8,8) veya 8-8 APK gibi).



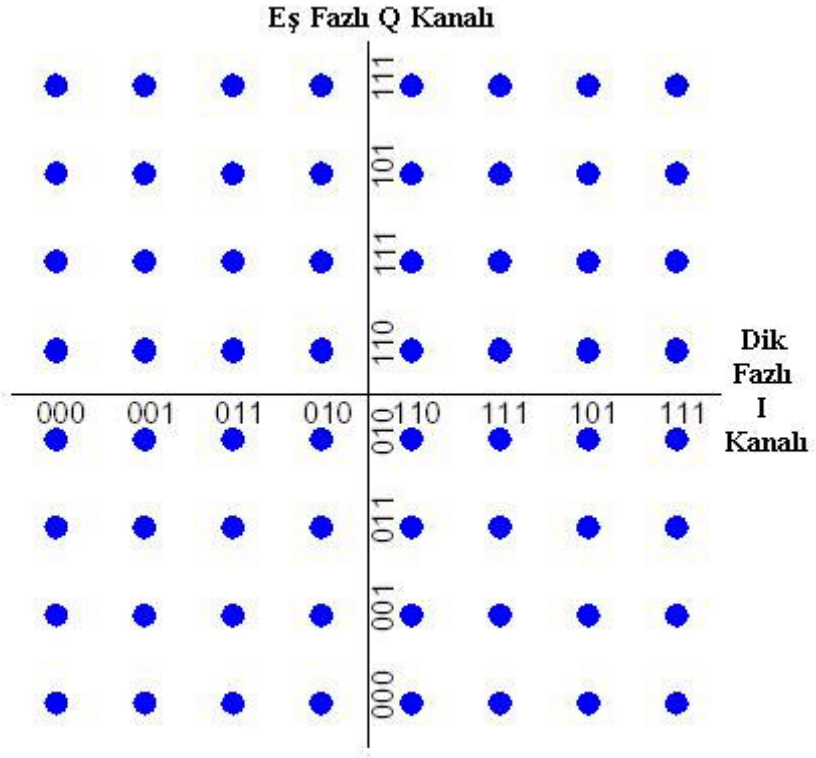
**Şekil 2.13 16-QAM(8,8) ve 16-QAM(4,12) (Villanen, 2005)**

Karesel olarak yerleştirilen sistemler QAM olarak adlandırılır.



**Şekil 2.14 16 APK (4, 8, 4) (Villanen, 2005)**

Şekil 2.14'deki QAM ifadesinde taşıyıcılar 3 farklı genliktedir. Birinci genlikte 4 adet taşıyıcı, ikinci genlikte 8 adet taşıyıcı, en dış genlikte ise 4 adet taşıyıcı bulunmaktadır.



**Şekil 2.15 64 QAM (Villanen, 2005)**

Benzer biçimde Şekil 2.15’de de taşıyıcılar kare biçiminde yerleştirilmiştir. En iyi performans taşıyıcıların kare biçiminde yerleştirildiği sistemlerden alınmaktadır.

### 3. NET VERİ HIZININ (THROUGHPUT) MODELLEMESİ

Net veri hızı (Throughput) belirli bir bandgenişliğinden birim zamanda iletebildiğimiz veri miktarıdır. Bu bölümde 802.11 kablosuz yerel alan ağlarında 54 Mbps olan band genişliğinden ne kadarının verimli olarak kullanılabildiği araştırılmaktadır. Bu bağlamda 54 Mbps'lık bandgenişliğini bir su borusuna, net veri hızını'da birim zamanda bu borudan akan su miktarına benzetebiliriz. Yine bu bölümde 802.11 mimarisinde net veri hızını etkileyen faktörler incelenecektir. Teorik ortamda net veri hızı hesaplama işlemleri yapılacaktır.

#### 3.1 Basit Erişim Yöntemi (BAM) ve CSMA/CA

Dağıtılmış koordinasyon fonksiyonu (DCF-Distributed Coordination Function) olarak da bilinen Basit Erişim Yöntemi (Basic Access Method) temelde bir çoklu erişim taşıyıcı algılama/Çarpışmadan sakınma (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance-CSMA/CA) mekanizmasıdır. Ethernet teknolojisinde başka bir CSMA protokolü olan CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) kullanılır.

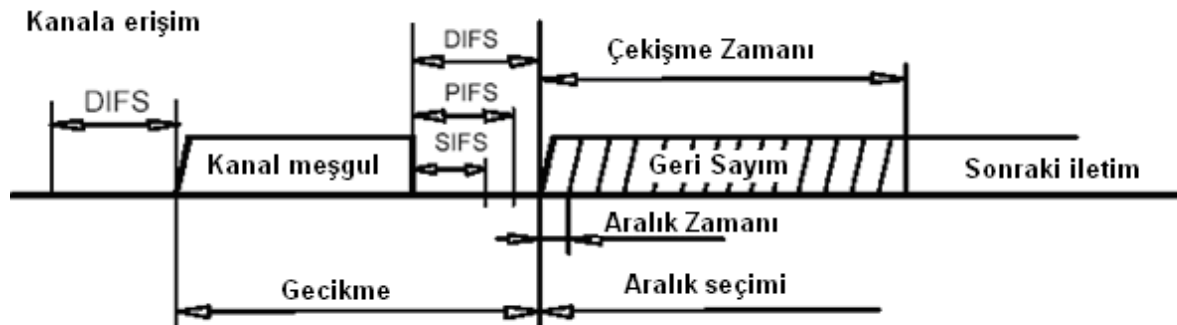
CSMA protokolünde iletim yapmak isteyen kullanıcı öncelikle iletim kanalını (hava) dinler, eğer kanal meşgul ise (örneğin başka bir kullanıcı veri gönderiyorsa), gönderimini geciktirir ve kanalın boşalmasını bekler. Eğer kanalın boş olduğu algılanırsa iletim başlar. Bu tür protokoller iletim kanalının yoğun olarak kullanılmadığı durumlarda kullanıcılara minimum gecikme ile iletim şansı tanıdığından çok verimlidir. Fakat her zaman birden fazla kullanıcının kanalı boş olarak algılayıp aynı anda iletme başlaması (collision-çarpışma) olasılığı vardır. MAC katmanı çarpışma esnasında paketlerin tekrar iletme başlamasını (retransmission) sağlar fakat bu durum önemli gecikmelere sebep olur. Ethernet teknolojisinde tekrar iletim mekanizması Üssel Rastlantısal Geri Sayım algoritmasına (Exponential Random Backoff algorithm) dayanır.

Kablolu bilgisayar ağlarında çok iyi çalışan çarpışma algılama (Collision Detection) mekanizması iki temel sebepten dolayı kablosuz sistemlerde kullanılamaz:

- Çarpışma algılama mekanizmasını uygulamak için aynı anda yayın ve alım yapmayı sağlayacak çift yönlü (Full duplex) bir alıcı, verici gerekmektedir. Bu gereksinim maaliyetleri önemli ölçüde arttırmaktadır. Bununla birlikte komşu frekanslar dolu iken aynı anda yayın ve alım yapmayı uygulamak oldukça zordur.
- Kablosuz sistemlerde bütün kullanıcıların birbirlerini görebileceklerini (Çarpışma algılama mekanizmasının temel çalışma prensibi) kabul edemeyiz. İletim yapmak isteyen ve kanalıda aynı anda boş olarak algılayan bir kullanıcı için alıcı tarafında (receiver) kanal boş olmayabilir. İletim yapmak isteyen kullanıcının kendi bulunduğu bölgede kanal boş, alıcının bulunduğu bölgede dolu olabilir (verici ve alıcı arasında fiziki mesafe iç ortamlarda 400 metre dış ortamlarda kullanılan antene göre 10km'ye kadar çıkabilir).

802.11 sistemlerinde bu problemleri DCF ile aşabilmek için çarpışmadan sakınma (Collision Avoidance) mekanizması ile birlikte onay (acknowledgement) paketleri kullanılır. Onay paketleri şu şekilde kullanılır:

İletim yapmak isteyen bir kullanıcı öncelikle kanalı dinler, eğer kanal dolu ise iletim ertelenir. Eğer kanal belirli bir süre (Distributed Inter Frame Space, DIFS) boyunca müsait ise kullanıcı iletme başlayabilir. Alım yapan kullanıcı veriyi sağlıklı bir şekilde aldıktan sonra vericiye bir onay paketi (ACK) gönderir. ACK mesajının alınması çarpışma olmadan iletimin gerçekleştiği anlamını taşır. İletim yapan kullanıcı belirli süre zarfında ACK mesajı alamazsa aynı veriyi tekrar iletme başlar ve belli sayıda denemeden sonra iletimi başarısız olmuş sayar ve iletimi durdurur. Şekil 3.1'de erişim mekanizmasının bir şeması gösterilmiştir.

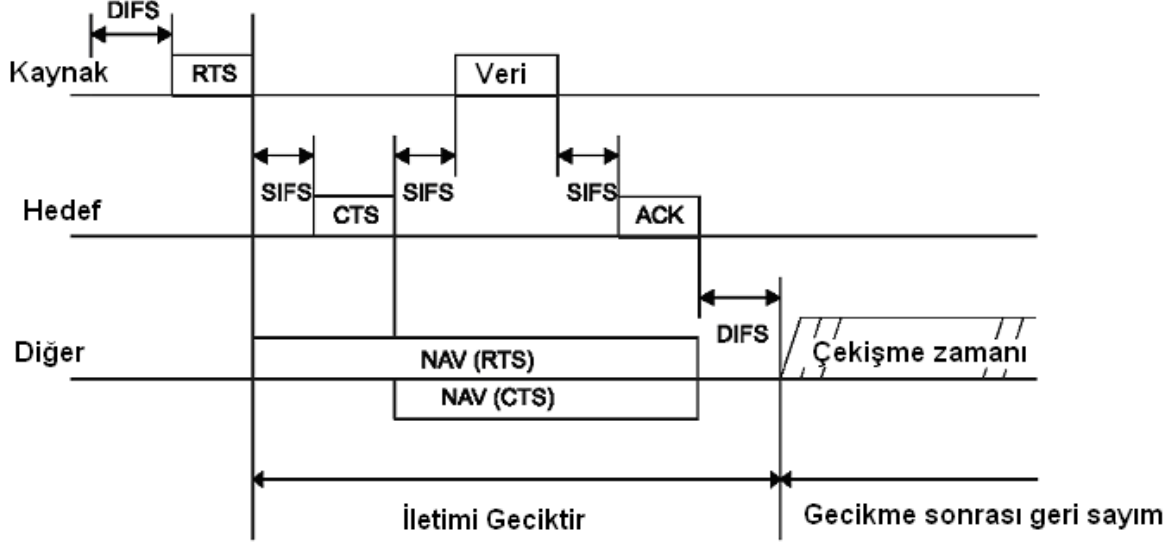


Şekil 3.1 Basit erişim yöntemi ve zamanlama [IEEE, 1997]

Bütün kullanıcıların birbirlerini görmedikleri durumların varlığından ötürü taşıyıcı algılama (carrier sensing) tek başına yeterli olmaz. İki kullanıcı arasındaki çarpışma olasılığını azaltmak amacıyla 802.11 standardı bir sanal taşıyıcı algılama mekanizması (Virtual Carrier Sensing) tanımlamıştır.

- İletim yapmak isteyen kullanıcı öncelikle RTS (Request to Send) denen küçük bir sinyalleşme paketi gönderir. RTS paketi kaynak adres, hedef adres ve kanalın meşgul edileceği iletim süresi (paketin iletimi için gereken süre + ACK mesajının alınması için gereken süre) bilgilerini içerir.
- Alım yapacak kullanıcı eğer kanal boş ise RTS paketine CTS (Clear to Send) denen bir kontrol mesajı ile yanıt verir. CTS mesajı aynı iletim süresi bilgisini içerir.

RTS ya da CTS paketini alan ağ içerisindeki bütün diğer kullanıcılar kendi sanal taşıyıcı algılama ibrelerine (Network Allocation Vector, NAV olarak da bilinir) kanalın meşgul edileceği süre bilgisini yazarlar. Bu bilgiyi fiziki olarak ağı dinlemek için de kullanırlar ve kanalın meşgul olduğu süre zarfında iletim ortamını dinlemezler. Şekil 3.2 iki kullanıcı arasındaki iletimi ve komşularının NAV ayarlarını göstermektedir. Bu mekanizma aradaki fiziki mesafeden ötürü alıcı tarafını göremeyen vericiden ötürü oluşan çarpışma (hidden node olarak da bilinir) olasılığını azaltır. Alıcı tarafından yayınlanan CTS mesajını alıcıya yakın bütün kullanıcılar duyacağı için, CTS mesajında belirtilen kanalın dolu olacağı süre boyunca diğer kullanıcılar iletim yapmayacaktır. RTS mesajında belirtilen kanalın meşgulliyet süresi bilgiside ACK mesajının verici tarafında çarpışmamasını sağlar. RTS ve CTS iletimleri çarpışmadan doğacak ek yükleride önler. RTS ve CTS mesajları küçük boyutlarda olduğundan çarpışmalar hızlıca algılanıp önlenabilir (bu RTS ve CTS'den oldukça büyük paketler için geçerlidir. Standard küçük paketlerin RTS/CTS kontrolünden bağımsız olarak da iletimine izin vermektedir. Bu durum RTS eşiği (RTS threshold) denen bir parametre ile kontrol edilir)



Şekil 3.2 RTS/CTS/Veri/ACK ve NAV akışı [IEEE, 1997]

Kablosuz linklerdeki yüksek Bit Hata Oranı (Bit Error Rate, BER) nedeniyle paketlerin bozulma olasılıkları yüksektir. Bozulmuş paketler düzgün iletilene kadar yeniden iletilecekleri için ağdaki ek yük artacaktır. 802.11 MAC protokolü bu durum için basit paket çerçeveleme (simple packet fragmentation) ve yeniden oluşturma (reassembly) mekanizmasına izin verir.

### 3.2 Ara Çerçeve Boşlukları (Inter Frame Spaces, IFS)

802.11 standardlarında farklı öncelikler sağlamak amacıyla tanımlanmış 4 IFS türü mevcuttur [IEEE, 1997].

**Aralık Zamanı (Time Slot)**, bir kullanıcının her zaman diğer bir kullanıcının kanala erişimini bir önceki zaman aralığında algılayabileceği şekilde tanımlanmıştır.

Aralık Zamanı = CCA (Clear Channel Assessment) Zamanı + RxTx Dönüş Zamanı + Hava İletim Zamanı + MAC işleme gecikmesi

- CCA Zamanı; kanal temiz karar mekanizmasının kanalın dolu/müsait olduğunu anlayabilmek için her aralık zamanında (slot time) uygunluğunu tanımlayan minimum zamandır (µs cinsinden).

- RxTx Dönüş Zamanı; PHY'ın ilk işareti göndermek için alım modundan iletim moduna geçmesi için gereken maksimum zamandır ( $\mu$ s cinsinden).
- Hava İletim Zamanı; Paketin verici kullanıcıdan alıcı kullanıcıya iletilene kadar geçen süredir ( $\mu$ s cinsinden).
- MAC işleme gecikmesi; MAC'in bir çerçeveyi işlemesi ve cevap hazırlaması için gereken çok kısa zaman dilimidir.

### **SIFS (Short Inter Frame Space) – Kısa Ara Çerçeve Boşluğu**

SIFS, basit haberleşme paketlerini ayırmak için kullanılır (Paket-ACK mesajlaşması). SIFS en küçük ara çerçeve boşluğudur ve pakelere öncelik (priority) vermek için kullanılır. Alıcı ve verici arasındaki iletim başarılı şekilde tamamlanırsa alıcı SIFS süresi kadar bekler ve ACK mesajını gönderir. İletim tamamlandığında kanal müsait duruma geçmektedir. Bu durumda iken ACK mesajının diğer mesajlara göre öncelik kazanmasını SIFS sağlar. IEEE tarafından 10  $\mu$ s olarak tanımlanmıştır.

SIFS süresi PHY tarafından belirlenen sabit bir süredir ve verici tarafının yayın modundan alım moduna geçmesi için gereken süreyide kapsar.

SIFS Süresi = RxRFGecikmesi + RxPLCP gecikmesi + MAC İşleme Gecikmesi + RxTx Dönüş zamanı

- RxRF Gecikmesi; havadaki işaretin son sembolünün iletilmesi ile PMD-Verisinin çıkarılması arasındaki çok kısa zaman dilimidir
- RxPLCP Gecikmesi; PLCP'nin PMD alım yolundan bir bitlik veriyi MAC katmanını iletebilmesi için gereken çok kısa zaman dilimidir.

### **PIFS (Point Coordination IFS) – Nokta Eşgüdümü Ara Çerçeve Boşluğu**

PIFS, erişim noktası (Access Point, AP) tarafından kanala diğer kullanıcılardan önce erişmek için PCF (Point Coordination Function) modu kapsamında kullanılır. PIFS süresi SIFS+Aralık Zamanı (Slot Time) değerindedir.

### **DIFS (Distributed IFS) – Dağıtılmış Ara Çerçeve Boşluğu**

DIFS, iletim yapmak isteyen kullanıcının iletme başlaması için kullanılır ve SIFS+2xAralık Zamanı olarak hesaplanır. Kullanıcı iletme başlamadan önce kanalın boş olduğunu anlamak için DIFS süresi kadar bekler.

### **EIFS (Extended IFS) Genişletilmiş Ara Çerçeve Boşluğu**

EIFS, bozulmuş bir paket alan kullanıcı için tanımlanmış daha uzun bir ara çerçeve zamanıdır. EIFS, Sanal Taşıyıcı Algılama mekanizmasındaki süre bilgisini (RTS, CTS'de kullanılan kanalın dolu olduğu süre) okuyamayan kullanıcıların çarpışmadan sakınması için kullanılır.

### **3.3 Üssel Geri Sayım Algoritması (Exponential Backoff Algorithm)**

Bir çarpışmadan sonra, paketleri çarpışan kullanıcıların aynı paketleri tekrar iletmeleri gerekmektedir. Geri sayım, kanala erişmek için farklı kullanıcıların çekişmesini çözmek için kullanılan iyi bilinen bir yöntemdir. Bu yöntemde her kullanıcı 0 ile tanımlanmış bir değer arasında rastgele bir sayı tutar ve kanala erişmek için o sayı kadar zaman aralığı bekler. Üssel geri sayım yönteminde, rasgele tutulan sayılardan sonra da bir çarpışma olursa, kullanıcılar tuttukları sayıyı üssel olarak arttıırırlar.

802.11 standardlarında aşağıdaki durumlar için üssel geri sayım algoritmasının mutlaka çalıştırılması tanımlanmıştır.

- Eğer kullanıcı ilk iletimden önce kanalın meşgul olduğunu algılamış ise
- Her tekrar iletimden sonra
- Başarılı iletimden sonra

Geri sayım algoritmasının çalışmayacağı tek durum, kullanıcının kanalın boş olduğunu algılayıp yeni bir paket iletmesi durumudur.

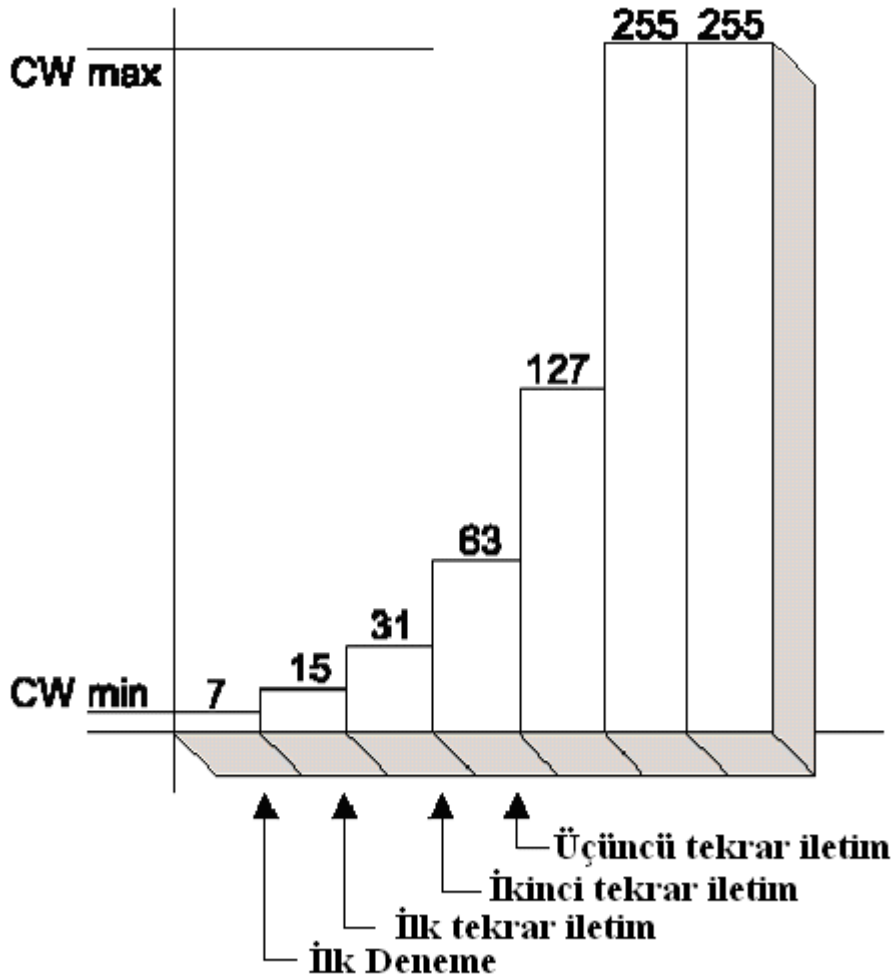
802.11 standardında geri sayım algoritması şu şekilde çalışır:

İlk deneme sonucunda kanalın meşgul olduğu algılanırsa, kullanıcı mevcut iletimin tamamlanmasını bekler. İletim tamamlandıktan sonra kullanıcı rasgele bir geri sayım aralığı seçer. Buna geri sayım zamanı (Backoff Time) denir.

Geri sayım zamanı = Rastgele  $[0, CW]$  x Zaman aralığı

$$CW_{min} \leq CW \leq CW_{max}$$

Collision Window (CW) ağda bir çarpışma olduğunun algılanması için geçen zamandır. Her çarpışmadan sonra Şekil 3.3'te görüldüğü gibi CW iki katına çıkarılır. Kanal boş ilken geri sayım aralığı sayacı işler ve backoff zamanı azalır. Kanal meşgul iken geri sayım aralığı durdurulur. Başarılı bir iletimden sonra CW  $CW_{min}$ 'e çekilir.



Şekil 3.3 CW'nin üssel artışına bir örnek [IEEE, 1997]

### 3.4 Çerçeve Tipleri

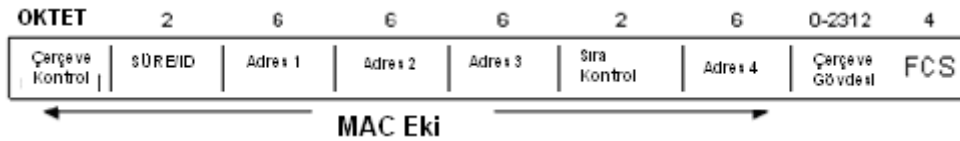
Bölüm 2.7’de veri, kontrol ve yönetim çerçevelerinden temel olarak bahsetmiştik. Bu bölümde her çerçeve tipinin kendine özgü özelliklerine göre kendi içlerinde alt bölümlere ayrıldığını göreceğiz.

Her paket, fiziksel katman tarafından tanımlanan Preamble ve PLCP ön eki (PLCP Header) denen paketler ile işlenir.

- Preamble: Bu alan senkronizasyon için gereken işaretleri, kanal eşleşmesi ve çerçeve başlangıcı bilgilerini içerir.
- PLCP ön eki: PLCP katmanı tarafından çerçeve kodunu çözebilmek için gereken bilgiyi taşır.

#### 3.4.1 MAC Çerçeve Formatı

MAC çerçevesi veri ve yönetim çerçevelerinde kullanılır. MAC çerçevesinin genel yapısı şekil 3.4’te gösterilmiştir.

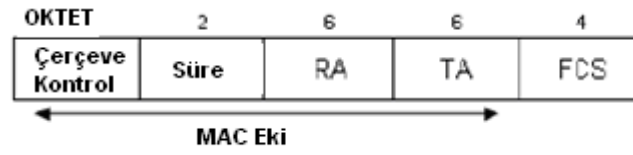


**Şekil 3.4 Genel MAC çerçeve yapısı [IEEE, 1997]**

- Çerçeve Kontrolü (Frame Control): Protokol versiyonu, tipi vs. bilgilerini içerir
- Süre/Kimlik (Duration/ID): NAV hesaplaması için gereken süre bilgisidir
- Adres1: Alıcı adresi
- Adres2: Gönderici adresi
- Adres3: Eğer dağıtım sisteminden ise kaynak adres, eğer dağıtım sistemine doğru ise hedef adres

- Adres4: Kablosuz dağıtım sistemlerinde kullanılır. Çerçeve bir AP'den diğer bir AP'ye gönderilir
- Sıra Kontrol (Sequence Control): Aynı çerçeveye ait bölümlerin sırasını gösterir
- CRC: 32 bitlik bir alandır

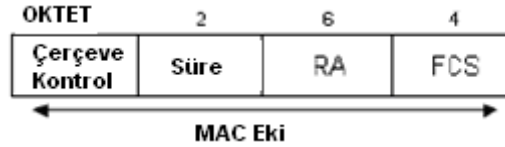
### 3.4.2 RTS Çerçeve Formatı



Şekil 3.5 RTS çerçevesi [IEEE, 1997]

- Süre: Kanalin meşgul edileceği süre bilgisini içerir. Veri iletim süresi + CTS çerçevesi + ACK çerçevesi + 3xSIFS süresine eşittir.
- RA: Alıcının adresi
- TA: RTS paketinin yayınlayan göndericinin adresi

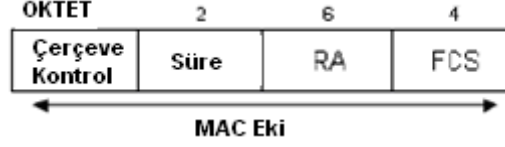
### 3.4.3 CTS Çerçeve Formatı



Şekil 3.6 CTS çerçevesi [IEEE, 1997]

- Süre: Bir önceki RTS paketinde belirtilen süre bilgisinden CTS yayınlamak için gereken süre ve bir SIFS süresi kadar eksiktir.
- RA: Bir önceki RTS paketinde paketindeki TA bilgisinin bir kopyasıdır. CTS mesajının alıcısını gösterir.

### 3.4.4 ACK Çerçeve Formatı



Şekil 3.7 ACK çerçevesi [IEEE, 1999]

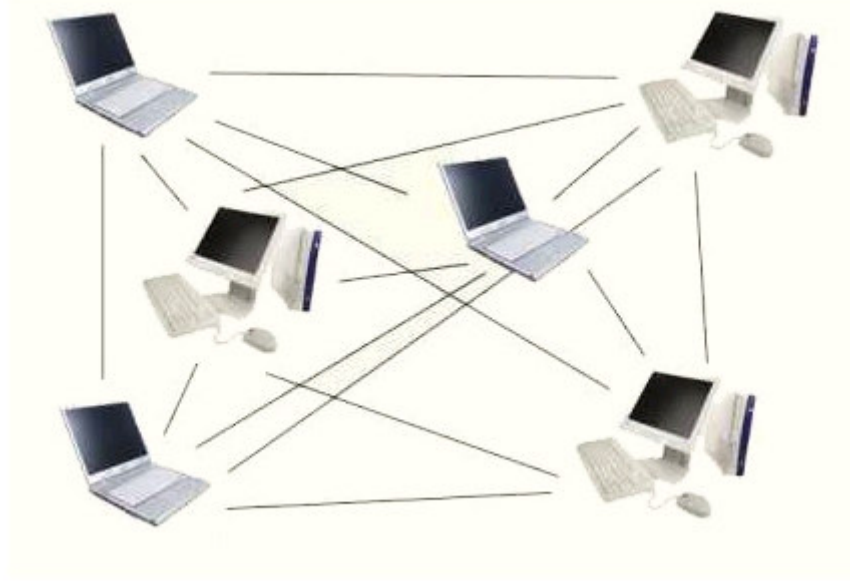
- Süre: Bir önceki çerçeveyi süre bilgisinden ACK mesajının iletilmesi için gereken süre ve 1 SIFS kadar kısadır.
- RA: Adres 2 alanındaki bilginin kopyasıdır. ACK mesajının alıcısını gösterir

### 3.5 PCF (Point Coordination Function), Nokta Eşgüdüm Fonksiyonu

Temel dağıtılmış eşgüdüm fonksiyonunun yanında (DCF) opsiyonel olarak, zaman sınırlaması olan servisler (ses, görüntü iletimi gibi) için tanımlanmıştır. PCF erişim noktasının daha kısa ara çerçeve boşlukları (PIFS) kullanarak bazı paketlere öncelik tanınmasını sağlar. PCF modunda yüksek erişim önceliğini kullanarak AP kullanıcıya kutuplu istekler (polling request) gönderir. Bu esnada diğer kullanıcılarında kanala erişimlerini sağlayabilmek amacıyla AP PCF ve dağıtılmış erişim arasında belirli bir süre bırakır.

### 3.6 Uç Uca Bağlantı (Ad Hoc) Modu

Uç uca bağlantı modu sayesinde merkezi bir ağ yapısı olmadan kullanıcılar arasında doğrudan bir kablosuz alan ağı oluşturulabilmektedir. Bu duruma iki dizüstü bilgisayar kullanıcısının birbirleri arasında dosya paylaşma durumunu örnek olarak gösterebiliriz. 802.11 standardı bu ihtiyacı Uç uca bağlantı çalışma modu ile gidermiştir. Bu durumda AP'lerin yaptığı işlevlerden bazıları uç kullanıcılar (diz üstü bilgisayar) tarafından yapılır (Beacon paketlerini yaratmak, senkronizasyon vs gibi), AP'lerin bazı işlevleride hiç desteklenmez.

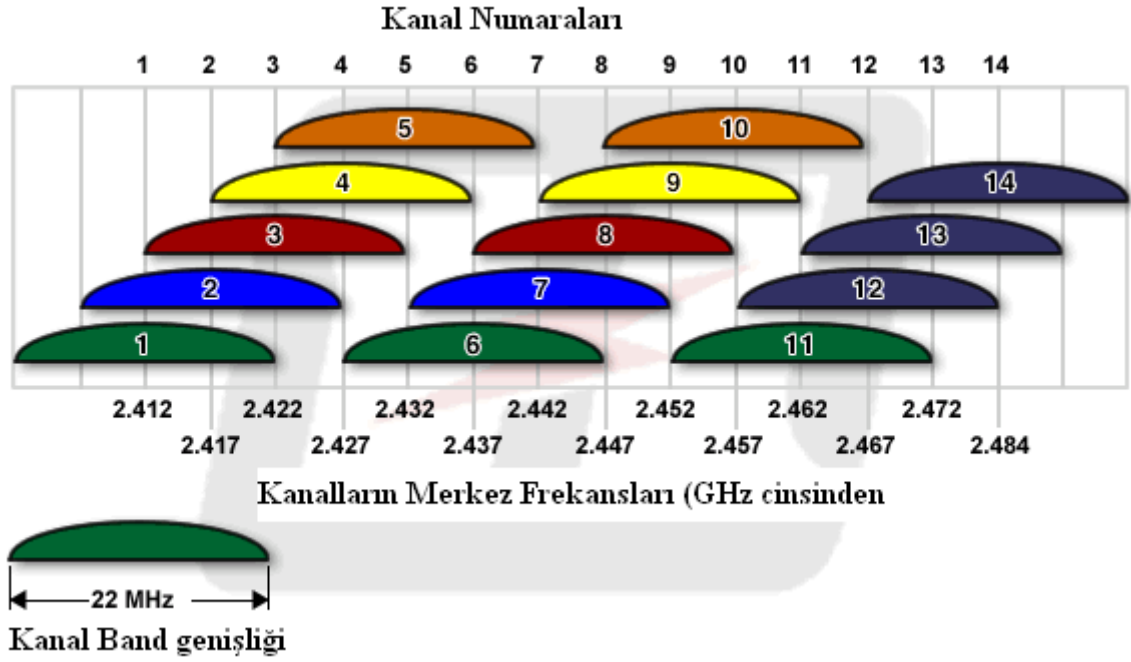


**Şekil 3.8 Uç aca bağlantı çalışma modu [IEEE, 1999]**

### 3.7 Fiziksel Katman

802.11 standardı hava arayüzü tarafından kullanılacak fiziksel katmanın özelliklerini tanımlamaktadır. Bu özellikler temelde modülasyon tipi, taşıyıcı frekansı, kanal bandgenişliği ve iletim gücü gibi karakteristiklerdir.

İkinci bölümde detaylarından bahsettiğimiz ilk standard FHSS, DSSS ve IR kullanmaktaydı. Fakat standardın geliştirilmesi ile daha yüksek hızlarda veri iletimi mümkün hale geldi. Örneğin 802.11b standardı ile 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps ve 11Mbps hızlarında veri iletimi sağlanabilmektedir. Ükelere göre değişmekle beraber temelde 2.400 ila 2.483 GHz arasında değişen 11 ya da 13 kanal (frekans) kullanılmaktadır.



**Şekil 3.9 IEEE 802.11 Kanal/Frekans spectrumu [IEEE, 1997]**

802.11b ile kapsama alanı yaklaşık 400 metre civarındadır. Haberleşen kullanıcıların arasındaki mesafe ile ters orantılı olarak veri iletim hızı düşmektedir. 802.11b standardı endüstride 2.4GHz frekans bandını ev kullanımına açan bir ilk olarak değerlendirilebilir. Daha sonra mikrodalga fırınlar, DECT telefonlar bu frekans bandını kullanarak evlerimize girdiler. 802.11a ve 802.11g standartları OFDM kullanımı sayesinde 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ve 54Mbps veri iletim hızlarına ulaşabilmektedirler. Sinyal gücü ile veri iletim hızı arasındaki ilişki kablosuz ağ cihazında kullanılan chipset'e göre değişmektedir. Kablosuz ağlarda yaygın olarak kullanılan chipset'lere örnek olarak: Broadcom, Atheros, Ralink, TI (Texas Instruments) sayılabilir. İlerleyen ölçümlerde ve testlerde kullanılan Atheros'un AR2417 chipset'i için veri iletim hızları için gereken alıcı güçleri aşağıda belirtilmiştir [Atheros, 2008].

802.11g için:

- -94 dBm @ 1 Mbps
- -93 dBm @ 2 Mbps
- -92 dBm @ 5.5 Mbps
- -86 dBm @ 6 Mbps

- -86 dBm @ 9 Mbps
- -90 dBm @ 11 Mbps
- -86 dBm @ 12 Mbps
- -86 dBm @ 18 Mbps
- -84 dBm @ 24 Mbps
- -80 dBm @ 36 Mbps
- -75 dBm @ 48 Mbps
- -71 dBm @ 54 Mbps

### 3.8 802.11 Kablosuz Ağlarda Net Veri Hızının Modellenmesi

802.11 kablosuz ağlarda maksimum net veri hızı (throughput) performansı alabilmek için gerekli olan şartlar bu bölümün konusunu oluşturmaktadır. Özellikle 2,4GHz frekansında çalışan kablosuz ağ standartları için (802.11b/g), çalışma frekansının lisansız bir frekans bandı olmasından doğan sorunlar detaylı ölçümler ile birlikte bu bölümde işlenecektir.

#### 3.8.1 Maksimum Net Veri Hızı

Maksimum net veri hesaplaması için uygulanacak senaryoda bir kullanıcının bir kablosuz erişim noktası (Access Point) ile TCP (Transmission Control Protocol) protokolü üzerinden haberleştiği öngörülmektedir. TCP paketini bir ACK mesajı takip etmektedir.

Veri paketini iletirken aşağıdaki işlemler gerçekleşecektir [IEEE, 1999]:

- Kullanıcı paketi göndermeye başlamadan önce kanalı dinler.
- Kanal müsait olarak algılanıyorsa en az bir DIFS süresi kadar dinlenmeye devam edilir. Eğer kanal müsait değilse, kullanıcı geri sayım algoritmasını çalıştırır ve kanal müsait olana kadar bu algortimayı çalıştırmaya ve beklemeye devam eder
- Transmission Control Protocol'ündeki (TCP) verinin iletilmesi

- Verinin iletilmesi ile ACK mesajının dönderilmesi arasındaki SIFS süresi
- 802.11 ACK mesajının iletilmesi

TCP ACK mesajı iletilirken aşağıdaki işlemlerden geçecektir:

- Kanalin müsait olduğunu anlamak için en az bir DIFS süresi kadar beklemek gerekmektedir. Eğer kanal müsait değil ise geri sayım algoritması işler ve bir den fazla kere DIFS süresi kadar beklemek gerekir
- TCP ACK mesajını içeren veri paketinin iletilmesi
- Veri paketinin alınması ve ACK mesajının yayınlanması arasındaki SIFS kadar bekleme süresi
- 802.11 ACK mesajının yayınlanması

İletimi yapılacak veri paketine ilave olarak 36 bayt'lık ön ek paketleri mevcuttur. 36 bayt'ın 28 bayt'ı 802.11 MAC (kontrol, yönetim, hata algılama ve adres bilgilerini içerir) ekidir. Kalan 8 bayt ise ağ katman protokolünü tanımlamak için kullanılır.

1460 bayt'lık bir veri paketini göndermek için 1536 bayt'lık bir iletim yapmamız gerekir. 40 bayt TCP/IP ekleri, 36 bayt MAC ekleri gönderilecek verinin üzerine bindirilir. TCP ACK mesajı için de 40 baytlı TCP/IP eki ve 36 baytlık MAC eki eklenir dolayısıyla toplamda 76 bayt'lık bir TCP ACK mesajı oluşur. Bu hesaplamaları yaparken geri sayım algoritmasının işletilmediğini varsayıyoruz. Yani paket bir kullanıcıdan iletmek üzere kanala gönderilmek istendiğinde kanalın müsait olduğu öngörülmektedir.

### **3.8.2 IEEE 802.11b kablosuz ağlarda net veri hızı:**

Bu çalışmada kabosuz ağ'daki erişim noktası ve kullanıcı cihazlarının -85dBm'den daha yüksek bir sinyal seviyesinde bağlı oldukları öngörülmektedir. Önceki bölümler de belirtildiği üzere 802.11b kablosuz ağlarında:

- -94 dBm @ 1 Mbps
- -93 dBm @ 2 Mbps

- -92 dBm @ 5.5 Mbps
- -90 dBm @ 11 Mbps

Bu öngörü ışığında:

Veri iletim oranı = 8 bit/sembol \* 1.375 Msembol/s = 11 Mbps olarak işleme alınmıştır.

- IEEE 802.11 standardında SIFS süresi 10µs olarak tanımlanmıştır.
- IEEE 802.11b standardı için aralık zamanı = 20 µs
- DIFS = 2 Aralık zamanı + SIFS = 50 µs
- Her veri çerçevesinin 192 µs'lik bir ön süresi vardır [IEEE, 1999]
- 802.11 ACK mesajı 14 bayt uzunluğundadır [IEEE, 1999]
- Her sembol 8 bit olmak üzere veri oranı 1.375Msembol/sn'dir.
- TCP veri paketi = DIFS + 802.11 veri paketi + SIFS + 802.11 ACK mesajı iletim  
 $= 50 \mu s + 192 \mu s + 1536/1.375 + 10 \mu s + 192 \mu s + 14/1.375 = 50 \mu s + 1310 \mu s + 10 \mu s + 203 \mu s = 1573 \mu s$
- TCP ACK mesajı = DIFS + veri + SIFS + 802.11 ACK = 50 µs + 192 µs + 76/ 1375 + 10 µs + 203 µs = 50 µs + 248 µs + 10 µs + 203 µs = 511 µs

Yukarıdaki hesaplamalar ışığında IEEE 802.11b standardında 1460 bayt'lık verinin iletilmesi 1573 µs + 511 µs = 2084 µs zaman almaktadır.

1460 bayt = 11680 bit

2084 µs = 2,084 x 10<sup>-3</sup> sn

**Net veri hızı =  $\frac{11680}{2,084 \times 10^{-3}} = 5,6 \text{ Mbit/saniye olarak hesaplanır.}$**

Bu demek oluyorki 11Mbps'lık bir bandgenişliğinde net veri hızımız 5,6 Mbps olabilmektedir. Kablosuz sistemlerin hayatımızda her geçen gün daha çok önem kazandığı, internet bağlantı hızının on megabit'ler mertebesine ulaştığı bir dönemde yerel ağ'da kablosuz iletişim hızının 5,6 Mbps olması ihtiyaçları karşılamamaktadır. Bu nedenle 802.11b kablosuz ağ cihazları teknolojiye görmeye alışkın olmadığımız bir hızla yerini 802.11 b/g (802.11g standardı geriye dönük olarak 802.11b standardını desteklemeyi gerektirmektedir) cihazlara bırakmıştır.

### 3.8.3 IEEE 802.11g kablosuz ağılarda net veri hızı:

Bu çalışmada kablosuz ağ'daki erişim noktası ve kullanıcı cihazlarının -70dBm'den daha yüksek bir sinyal seviyesinde bağlı oldukları öngörülmektedir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi 802.11g için:

- -86 dBm @ 6 Mbps
- -86 dBm @ 9 Mbps
- -86 dBm @ 12 Mbps
- -86 dBm @ 18 Mbps
- -84 dBm @ 24 Mbps
- -80 dBm @ 36 Mbps
- -75 dBm @ 48 Mbps
- -71 dBm @ 54 Mbps

Bu öngörü ışığında:

Veri iletim oranı =  $216 \text{ bit/sembol} * 0.25 \text{ Msembol/s} = 54 \text{ Mbps}$  olarak işleme alınmıştır.

- IEEE 802.11 standardında SIFS süresi  $10\mu\text{s}$  olarak tanımlanmıştır.
- 802.11g standardına özel olarak, kısa zaman aralığı (slot time)  $9\mu\text{s}$ , uzun zaman aralığı  $20\mu\text{s}$  olarak tanımlanmıştır. Kısa zaman aralığı kablosuz ağ sadece 802.11g modunda çalıştırıldığında geçerli olur (bu modda iken 802.11b geri uyumluluğu yoktur).
- DIFS süresi =  $(2 \times \text{zaman aralığı}) + \text{SIFS}$  ile hesaplanır
- Her veri çerçevesinin  $20 \mu\text{s}$ 'lik bir ön süresi vardır ve işaret eklentisi olarak her paketin sonunda  $6 \mu\text{s}$ 'lik bekleme süresi vardır
- 802.11 ACK mesajı 14 bayt uzunluğundadır
- Her sembol 216 bit olmak üzere veri oranı  $0.25 \text{ Msembol/sn}$ 'dir. Örneğin 54 Mbps iletim hızında bir sembolün iletilmesi  $4 \mu\text{s}$  almaktadır.
- TCP veri paketini 1536 bayt yani  $1536 \times 8 = 12288 \text{ bit}$  olarak alalım. Bu veriyi iletmek için 57 sembol'e ihtiyacımız vardır.
- 14 bayt = 112 bit uzunluğundaki 802.11 ACK mesajı için bir sembole ihtiyacımız vardır

- 76 bayt = 608 bit uzunluğundaki TCP ACK mesajını iletmek için 3 sembol'e ihtiyacımız vardır
- Eğer sadece 802.11g modu kullanıyorsak kısa zaman aralığı kullanabiliriz

Bu durumda TCP veri paketi = DIFS + 802.11 veri paketi + SIFS + 802.11 ACK

$$\begin{aligned}
 &= 28 \mu s [SIFS + 2 \times \text{kısa zaman aralığı} (9 \mu s)] + 20 \mu s + 57 \times 4 \mu s + 6 \mu s + 10 \mu s + 20 \\
 &\mu s + 1 \times 4 \mu s (802.11 \text{ ACK}) + 6 \mu s \\
 &= 322 \mu s
 \end{aligned}$$

TCP ACK paketi = DIFS + veri + SIFS + 802.11 ACK

$$\begin{aligned}
 &= 28 \mu s + 20 \mu s + 3 \times 4 \mu s (76 \text{ bayt'lık TCP ACK mesajı}) + 6 \mu s + 10 \mu s + 30 \mu s \\
 &= 106 \mu s
 \end{aligned}$$

Yukarıdaki hesaplamalar ışığında 802.11g standardında 1460 bayt'lık bir paketi göndermek için  $322 + 106 = 428 \mu s$ 'lik bir zaman gerekmektedir.

$$1460 \text{ bayt} = 11680 \text{ bit}$$

$$428 \mu s = 0,428 \times 10^{-3} \text{ sn}$$

$$\text{Net veri hızı} = \frac{11680}{0,428 \times 10^{-3}} = 27 \text{ Mbit/saniye olarak hesaplanır.}$$

802.11b ile kıyaslandığında 802.11g'de elde edilen net veri hızı endüstrinin ihtiyaçlarına geniş ölçüde yanıt verebilmiştir. 802.11g ile ulaşılan noktada; büyük dosya transferleri, IP üzerinden ses iletimi (VoIP – Voice Over Internet Protokol), IP üzerinden televizyon yayını (IPTV) gibi teknolojiler kablosuz bilgisayar ağları üzerinden uygulanabilir hale geldiler. IEEE VoIP ve IPTV gibi yüksek öncelik taşıması gereken servisler için 802.11e (Wireless QoS – Kablosuz servis kalitesi olarak da bilinir) standardını yayınlamıştır. 802.11e gereğince video ve ses paketlerine diğer veri paketlerine göre kablosuz ağda öncelik verilmesi sağlanır. Bu durumun önemini daha iyi anlamak için şöyle bir örnek verebiliriz. Size gönderilen bir e-posta dosyasını 20 saniye sonra almak çoğu zaman haberleşme açısından önemli bir problem teşkil etmezken, internet üzerinden telefon görüşmesi (VoIP) yaparken karşı tarafın sesini 3 saniye gecikmeli aldığımızda bile telefon görüşmesinde sesler üst üste binmeye başlayacaktır.

Bu nedenle ses ve video gibi servis önceliği gerektiren veri paketleri IEEE tarafından belirlenmiş ve kablosuz ağ üzerinde öncelikli olarak iletimleri hedeflenmiştir.

Uygulamada kablosuz ağlardan birden fazla kullanıcının olması çok doğal bir durumdur. Yukarıdaki hesaplamalarda kablosuz ağdaki bütün cihazların IEEE 802.11g olduğu varsayılmaktadır. Peki kablosuz ağda IEEE 802.11g ve IEEE 802.11b cihazlar bir arada olduğunda durum nasıldır? IEEE 802.11 standardında çarpışmayı önlemek için opsiyonel RTS/CTS mekanizması geliştirilmiş olsa da CTS mesajı OFDM modülasyonunu kullanan 802.11g modunda yayınlandığında, kablosuz ağdaki DSSS kullanan 802.11b cihazlar bu mesajı anlayamayacaktır. Bu nedenle IEEE 802.11b/g karışık modunda çalışan erişim noktaları kablosuz ağda 802.11b modunda çalışan bir kullanıcı algıladığında kendilerini çarpışma koruma moduna alırlar. IEEE için bu gibi durumlar için iki çeşit çarpışma koruma modu tanımlanmıştır. CTS-to-self ve RTS-CTS diye bilinen bu iki çarpışma modu için kablosuz net veri modellemeleri aşağıda verilmiştir.

CTS-to-self yöntemi için net veri hızı hesaplırsak:

- 802.11b cihazların algılayabileceği bir CTS yayınlanır. Bu durumda 192  $\mu$ s ön bekleme süresi ve 11Mbps hızında 14 bayt'lık 802 ACK mesajının iletilmesi gerekmektedir.
- Kablosuz ağda 802.11b cihazlar olduğu için sadece 802.11g modunda kullanılabilen kısa zaman aralığı geçerli değildir. Yani DIFS=50  $\mu$ s'dir
- TCP verisi = DIFS + CTS + SIFS + 802.11 verisi + SIFS + 802.11g ACK = 50  $\mu$ s + 203  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 254  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 30  $\mu$ s = 557  $\mu$ s
- TCP ACK paketi = DIFS + CTS + SIFS + veri + SIFS + 802.11 ACK = 50  $\mu$ s + 203  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 38  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 30  $\mu$ s = 341  $\mu$ s

Yukarıdaki hesaplamalar ışığında ağda 802.11b cihazlar bulunduğu durumda çalışan CTS-to-self yöntemi ile 1460 bayt'lık bir paketi göndermek için 557 + 341 = 898  $\mu$ s'lik bir zaman gerekmektedir.

$$1460 \text{ bayt} = 11680 \text{ bit}$$

$$898 \mu\text{s} = 0,898 \times 10^{-3} \text{ sn}$$

$$\text{Net veri hızı} = \frac{11680}{0,898 \times 10^{-3}} = \mathbf{13 \text{ Mbit/saniye olarak hesaplanır.}}$$

Hidden node probleminden tümüyle korunabilmek için RTS-CTS mekanizmasının çalışması gerekmektedir. RTS mesajı 20 bayt'lık veri içerdiği için CTS'den biraz daha büyük bir mesajdır. Kablosuz ağda 802.11b cihazlar olduğunda RTS-CTS mekanizması çalışması durumunda net veri hızı hesaplarsak:

- TCP verisi = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + 802.11 verisi + SIFS + 802.11g ACK = 50  $\mu$ s + 207  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 203 + 10  $\mu$ s + 254  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 30  $\mu$ s = 774  $\mu$ s
- TCP ACK mesajı = DIFS + RTS + SIFS + CTS + SIFS + veri + SIFS + 802.11 ACK = 50  $\mu$ s + 207  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 203  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 38  $\mu$ s + 10  $\mu$ s + 30  $\mu$ s = 558  $\mu$ s

Yukarıdaki hesaplamalar ışığında ağda 802.11b cihazlar bulunduğunda çalışan RTS-CTS yöntemi ile 1460 bayt'lık bir paketi göndermek için 774 + 558 = 1332  $\mu$ s'lik bir zaman gerekmektedir.

$$1460 \text{ bayt} = 11680 \text{ bit}$$

$$1332 \mu\text{s} = 1,332 \times 10^{-3} \text{ sn}$$

$$\text{Net veri hızı} = \frac{11680}{1,332 \times 10^{-3}} = \mathbf{8,7 \text{ Mbit/saniye olarak hesaplanır.}}$$

Bu durumda dahil 802.11g ile elde edilmiş olan net veri hızı 802.11b ile elde edilebilecekten fazladır sonucuna varabiliriz.

Kablosuz ağlarda net veri hızını daha da arttıracak bilinen yeni standard IEEE 802.11n standardı henüz tamamlanmamıştır. 802.11n standardı ile kablosuz ağlarda 300 Mbps bandgenişliği ve 150 Mbps net veri hızına ulaşılabileceği ön görülmektedir. IEEE 802.11n standardı henüz tamamlanmamış olmakla yüksek hızlara ulaşabilmek için kullanılan iki önemli yöntem endüstri'ye yayınlanmıştır. Yeni yöntemler henüz tüm detayları ile açıklanmadığı için bu tezin içeriğinde incelenmeyecektir. Özet olarak IEEE tarafından 802.11n teknolojisi ile yapılan iki önemli geliştirme; MIMO (Multi Input Multi Output) ve channel bounding teknolojileridir. Bu iki yöntem kablosuz ağların gelecek yıllardaki gelişimine önemli ölçüde ışık tutacaktır.

MIMO teknolojisi sayesinde, kablosuz erişim noktası cihazlarında ki anten sayısı üç'e çıkabilmektedir. Anten sayısının artmasının yanında MIMO'nun sunduğu en büyük avantaj olarak antenlerin aynı anda çalışabilmesi gösterilmektedir. Bu sayede kablosuz ağlarda veri kaybına neden olan ve verinin tekrar gönderilmesine ve dolaylı olarak net veri hızının düşmesine sebep olan multi-path olarak bilinen çoklu yol etkisi önemli ölçüde önlenmektedir. 3 anten ile de eş zamanlı olarak verileri alabilen erişim noktası, 3 antenin de aldığı işaretleri birbiri ile karşılaştırıp en az hatalı işareti seçer. Bu sayede aynı işaretin çevresel yansımalarından ötürü farklı zamanlarda alınmasına ve faz farklarına neden olarak işaretin kaybına yol açan çoklu yol etkisi büyük ölçüde önlenmiş olur.

Channel bounding (kanal çoklamak) yöntemi sayesinde erişim noktası yayın yaparken iki kanalı aynı anda kullanabilmektedir. Önceki bölümlerde bahsedilen 13 kanal içinden örtüşüm oranı düşük olan iki kanal seçilir (1. ve 6. kanallar gibi) ve mevcut bandgenişliği iki katına çıkarılır. Aynı anda iki kanal kullanımı girişim olasılığını arttırır. Bu nedenle eş zamanlı olarak tek anten kullanabilen 802.11g iletişim cihazlarında bu methodu uygulamak risklidir. Fakat MIMO teknolojisi sayesinde birden fazla anten ile gönderim/alım (transmit/receive) yapabilen 802.11n cihazları girişimden etkilenme olasılığını da minimuma indirir ve iki kanalın aynı anda kullanılması sayesinde kazanılan ekstra bandgenişliği sayesinde yüksek veri iletişim hızlarına erişir.

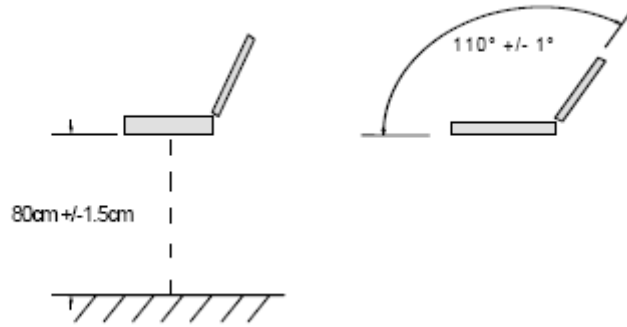
#### 4. 802.11 KABLOSUZ AĞLARDA NET VERİ HIZI ÖLÇÜMLERİ

Bölüm 3.8’de kablosuz ağlarda IEEE 802.11 standartları tarafından tanımlanmış veri trafik akışına göre, net veri hızının teorik olarak maksimum ne olabileceğini hesapladık. Bu bölümde ise net veri hızının pratik ortamda çeşitli ölçüm araçları kullanarak ölçümünü yapacağız. Uygulama üzerinde işaret sinyal gürültü oranının ve mesafenin net veri hızı üzerindeki etkilerini inceleyeceğiz ve teorik hesaplar ile karşılaştıracacağız.

Ölçümler esnasında IEEE tarafından Şubat 2008 tarihinde yayınlanmış olan IEEE P802.11.2™/D1.01 “Recommended Practice for the Evaluation of 802.11 Wireless Performance” (802.11 Kablosuz performans ölçümlerinde tavsiye edilen pratikler) makalesindeki ölçüm yöntemleri ve kuralları esas olarak alınmıştır.

##### 4.1 Uygulama Ortamının İncelenmesi

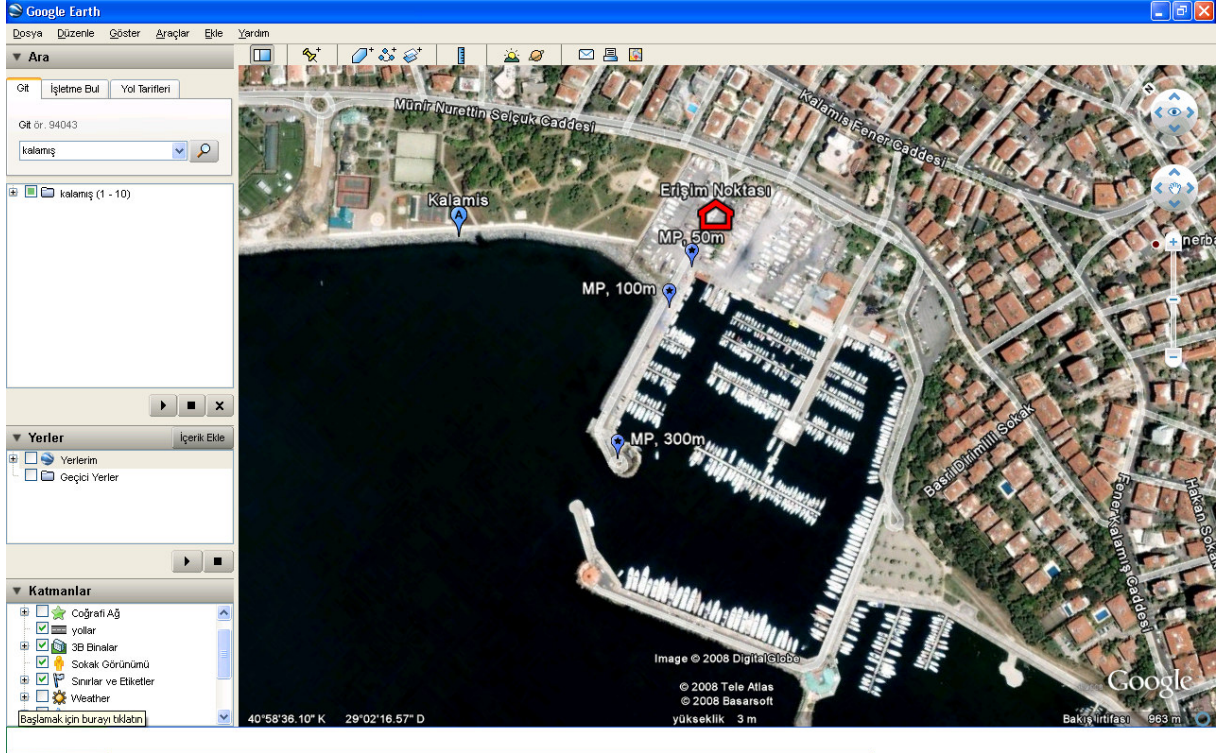
Ölçümlerin yapıldığı uygulama ortamında kablosuz istemcinin konumu Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



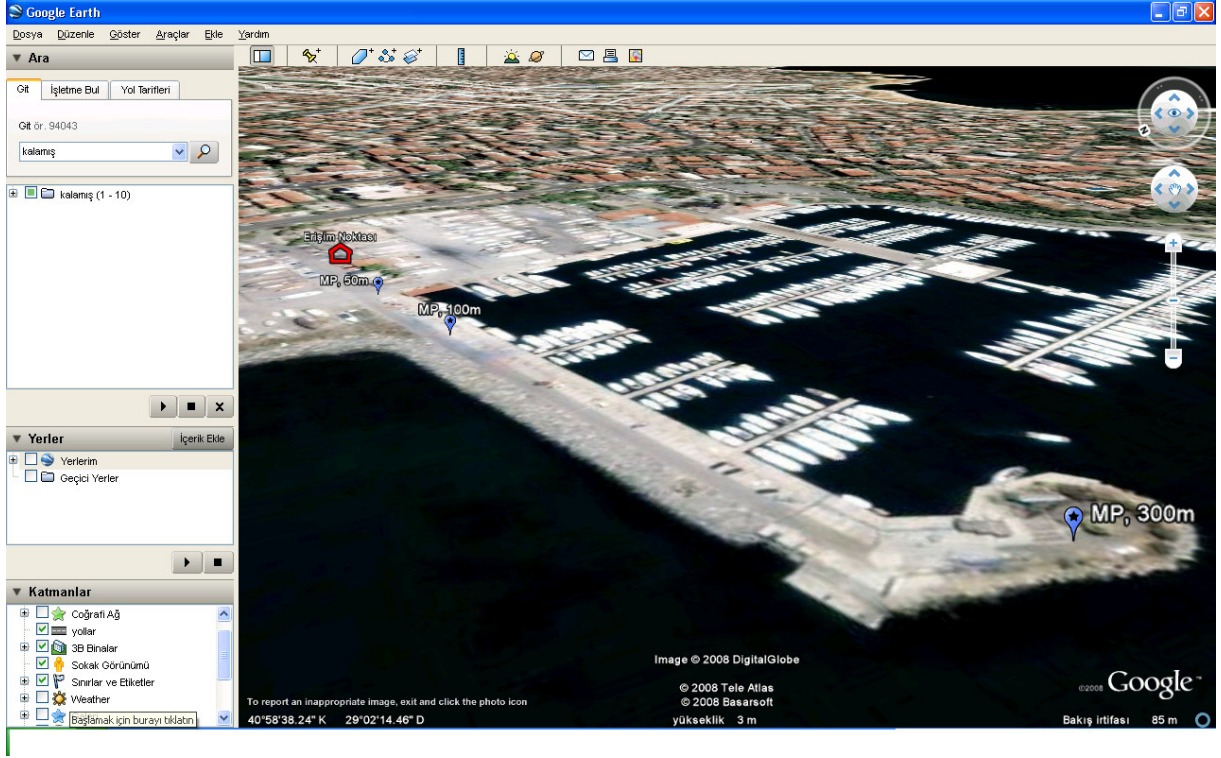
**Şekil 4.1 Uygulama ortamında kablosuz istemci konumu (IEEE, 2008)**

IEEE tarafından belirlenen ölçüm prosedürlerine göre, kablosuz ölçümler için kullanılacak olan istemci, ölçümler sırasında yerden 80cm yükseklikte sabit bir zemin üzerinde bulunmalıdır. Diz üstü bilgisayarlarda kablosuz iletişim için kullanılan 2dBi kazanca sahip çok yönlü yayın yapan (omni) anten LCD ekranın yanal yüzeyinde bulunduğundan, ölçüm ortamında LCD ekran ile yatay düzlem arasında 110 derecelik açı bulunmalıdır.

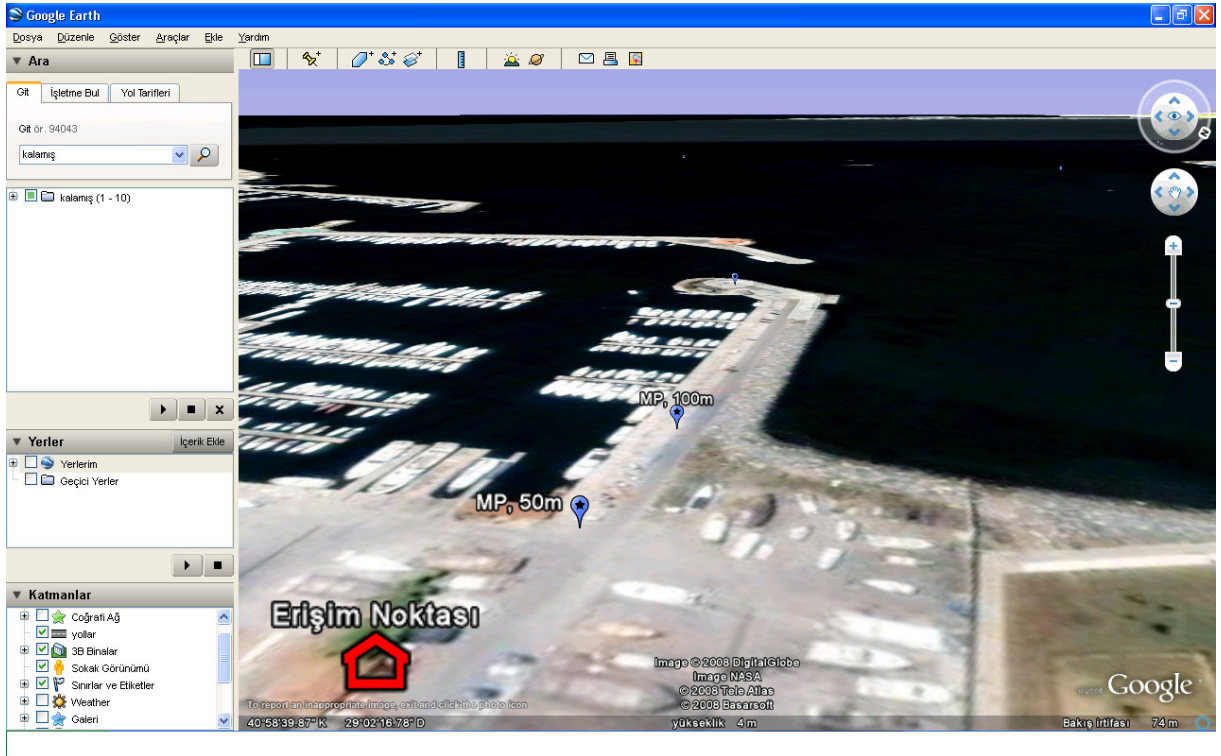
Ölçümler dış ortamda ve açık alanda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yeri, Kablosuz Erişim Noktası ile kablosuz istemcinin (client) birbirleri arasında doğrudan görüş kurabilecekleri şekilde seçilmiştir. İstanbul Fenerbahçe semtinde bulunan Kalamış Marinası ölçüm yeri olarak belirlenmiştir. Ölçümler 1 metre ile 290 metre arasında her 10 metre mesafede bir tekrarlanmıştır. Kalamış Marina'nın Google Earth programından faydalınarak çeşitli açılardan alınmış uydu görüntüleri:



**Şekil 4.2: Kalamış marina**



Şekil 4.3: Kalamış marina



Şekil 4.4: Kalamış marina

Uygulama ortamını oluşturan bileşenler:

#### **Kablosuz Erişim Noktası:**

- Ölçümlerde erişim noktası olarak Cisco Aironet kullanılmıştır. Kullanılan erişim noktasında Atheros'un AR-2417 IEEE 802.11a/b/g uyumlu chipseti bulunmaktadır.
- Erişim noktası IEEE 802.11a, IEEE 802.11b ve IEEE 802.11g standartlarını desteklemektedir.
- Ölçümler 2,4GHz ISM bandı üzerinde yapılmıştır. Uygulamada 2,4GHz frekans bandında ETSI tarafından belirlenmiş 13 farklı kanal üzerinde ölçümler tekrarnacaktır. Bu sayede girişimin net veri hızı üzerindeki etkilerini incelemek amaçlanmaktadır.
- Erişim noktası üzerinde 2dBi kazanca sahip çok yönlü (360 derece yayın yapan omni directional) anten kullanılmıştır.
- Erişim noktasının çıkış gücü ( $P_T$ ) 18dBm'dir.

#### **Bilgisayar**

- Net veri hızı ölçümleri için iki adet bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayarlardan bir tanesi erişim noktasına ethernet kablosu ile diğeri ise kablosuz olarak bağlanmıştır.
- Bilgisayarlar üzerinde
  - Ethernet bağlantısı için Intel(R) PRO/1000 PL Network Connection kartı. Bu bilgisayar ölçümlerde bitiş noktası (end point) olarak ayarlanacaktır ve ethernet kartına 192.168.0.7 sabit IP adresi verilecektir.
  - Kablosuz bağlantı için Cisco Aironet AIR-CB21AG-W-K9 model PCMCIA kartı bulunmaktadır
  - Kablosuz istemci olarak kullanılan bilgisayardaki anten kazancı 2dBi'dir
- Bilgisayarların işletim sistemleri WinXP'dir

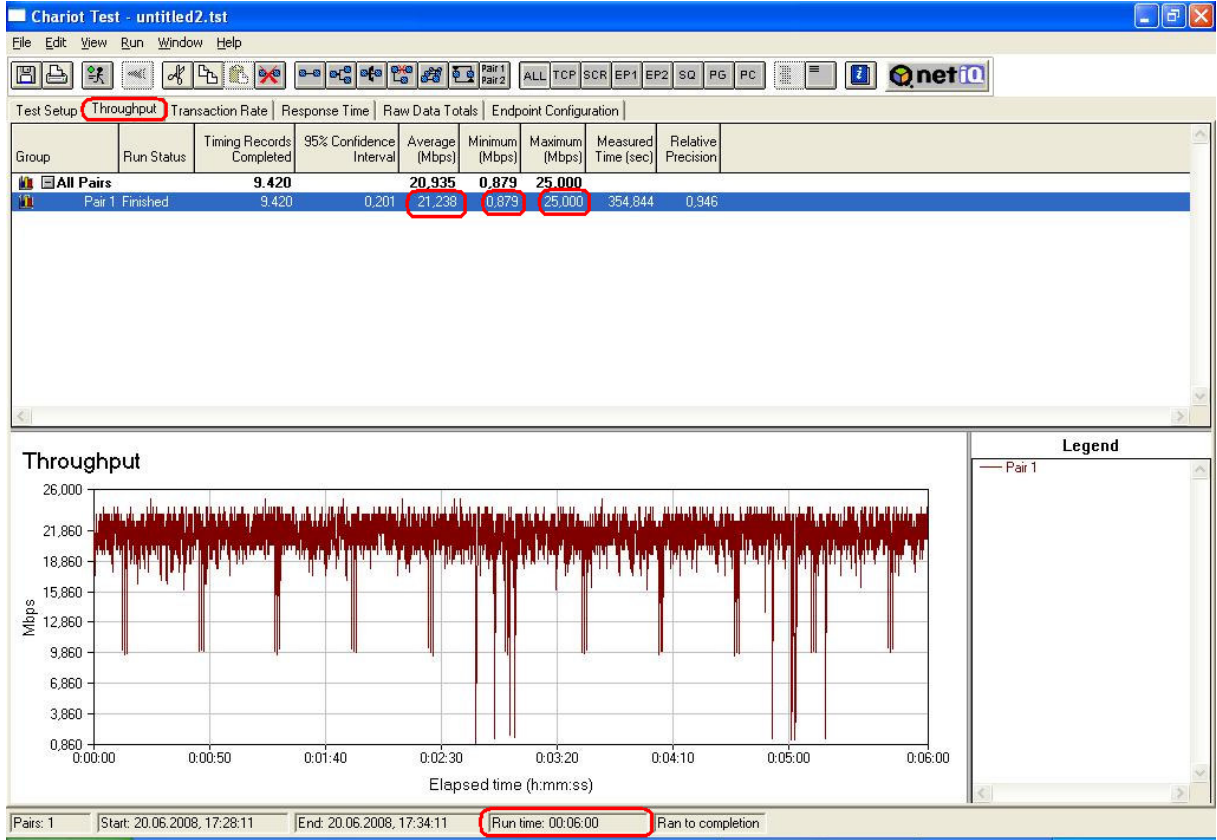
#### **Cat 5 Ethernet Kablosu**

- Erişim noktası ile bilgisayar bağlantısını yapmak için 10/100Mbps hızında cat 5 ethernet kablosu

## Net Veri Hız Ölçülmesi

Net veri hızı ölçümlerinde Net IQ Chariot paket jeneratöründen yararlanılmıştır. NetIQ Chariot, farklı protokolleri kullanan, farklı büyüklükte paketler yaratarak bu paketlerin akışını sağlayan ve net veri hızı ölçmek için kullanılan lisanslı bir yazılımdır. Chariot net veri hızı ölçümlerinde paket üretici program olarak endüstride çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Net veri hızı ölçmek için biri istemci diğeri sunucu olan iki uç noktaya ihtiyaç duyulur. Chariot TCP ve UDP paketleri yaratarak ağ üzerindeki iki uç nokta arasında bu paketleri akıtır ve net veri hızı ölçümünü yapar.

Chariot programı ile istenen süre boyunca net veri hızı ölçümü yapılabilir. Program ölçüm sonuçlarını grafiksel olarak yazdırmakta ve aynı zamanda minimum, maksimum ve ortalama net veri hızı değerlerini test sonucunda sayısal olarak vermektedir. Bu tez kapsamında yapılan net veri hızı ölçümlerinde, ölçüm süresi olarak 6 dakika seçilmiştir.

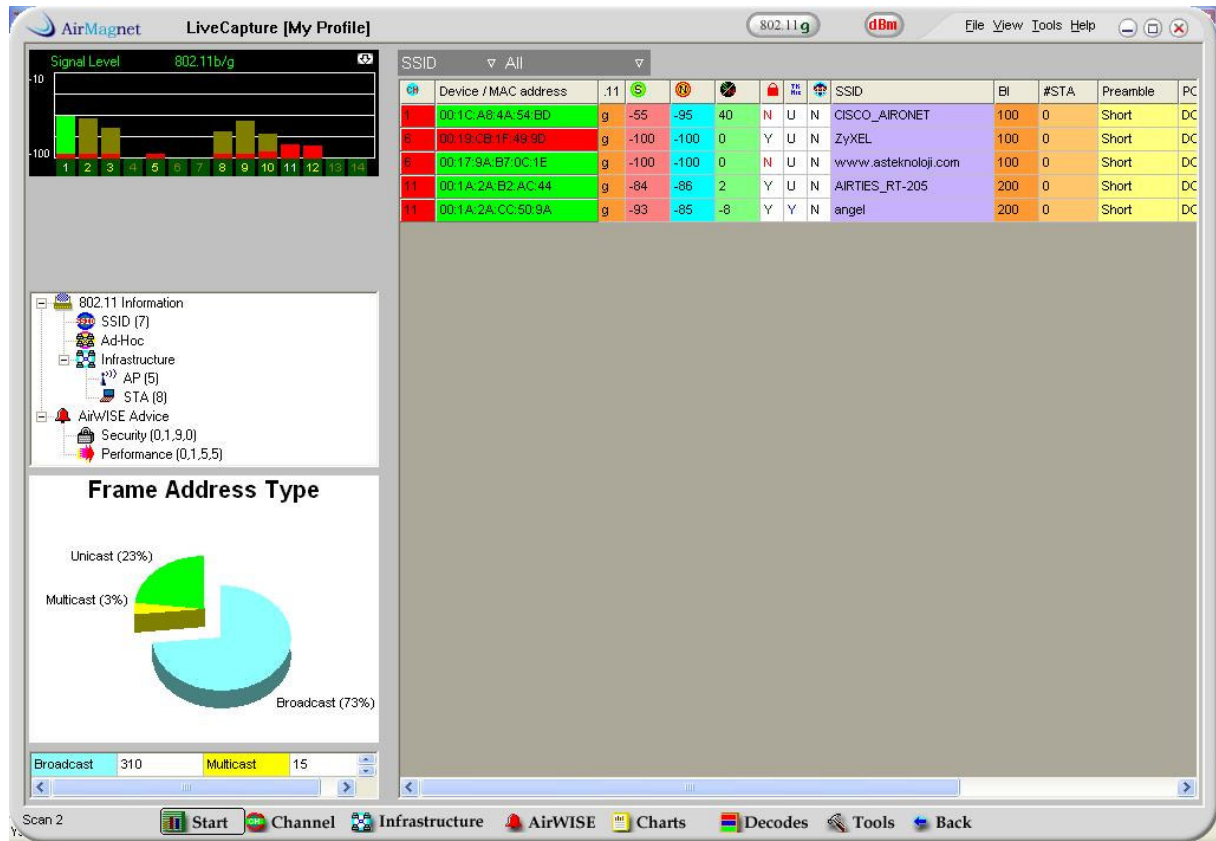


Şekil 4.5:Net IQ Chariot

## Frekans Spektrum Analizörü

Ölçümlerde frekans spektrum analizörü olarak AirMagnet kullanılmıştır. AirMagnet 2.4GHz frekans bandında işaret sinyal gücünü ve frekans gürültüsünü desibel cinsinden ölçen lisanslı bir yazılımdır. AirMagnet frekans analizörü olarak işaret gücü, girişim, gecikme, tekrar paket gönderme gibi birçok değeri ölçebilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, AirMagnet frekans tayf analizörü (frekans spectrum analyser) olarak kullanılmıştır. Ölçümlerin yapıldığı Kalamış Marina bölgesinde farklı zaman dilimlerinde ölçümler tekrarlanmış ve frekansların boş kanal gürültüleri belirlenmiştir.

AirMagnet hiçbir Erişim Noktasına bağlanmadan bütün frekansları tarayarak boş kanal frekans gürültülerini ölçebilmektedir.



**Şekil 4.6: Air Magnet ile boş kanal girişim ölçümü**

Bunun yanı sıra belirli bir frekans'a ayarlandığında o frekans'daki bütün haberleşme paketlerini analiz ederek, paket kayıplarını ve tekrarlanarak iletilen paketleri yüzdesel olarak vermektedir.

AirMagnet LiveCapture [My Profile] 802.11g dBm File View Tools Help

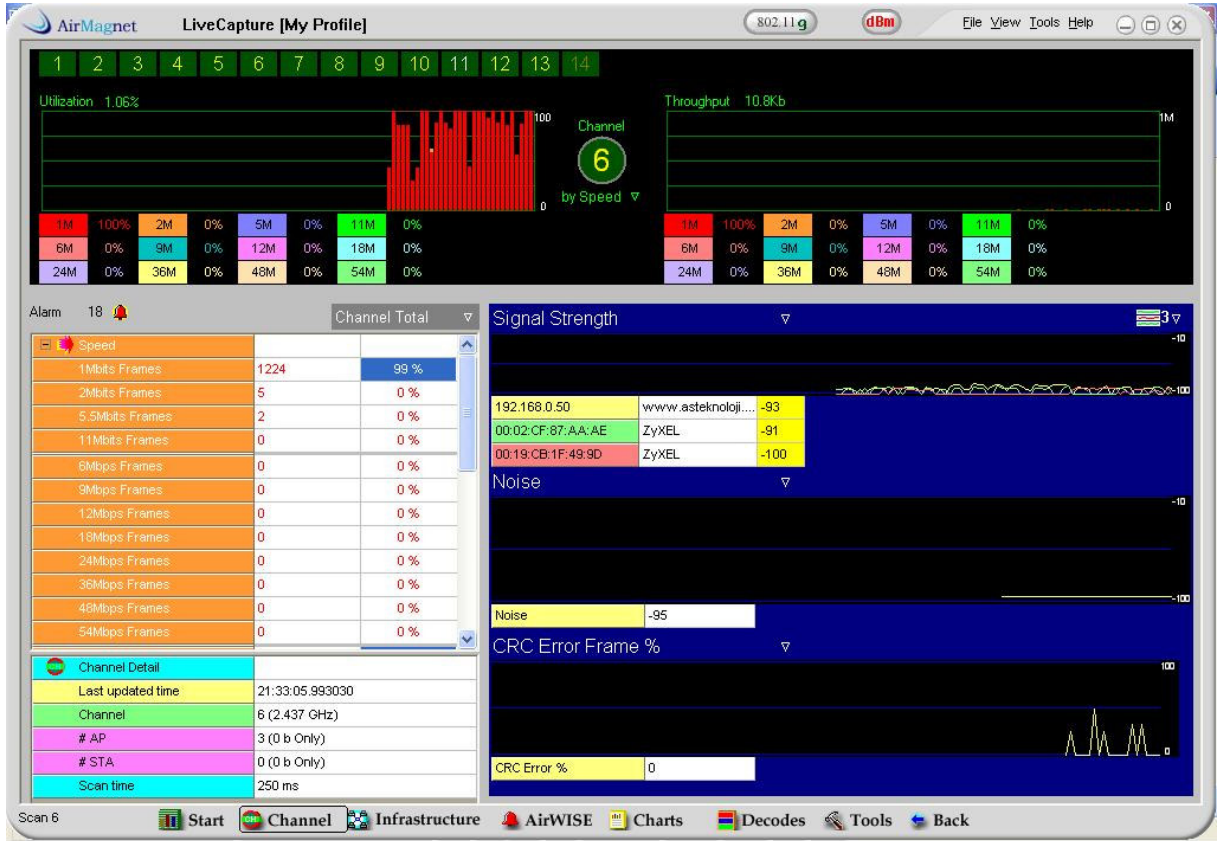
Filter [Default] ALL Channels

| Frame Gap | SNR | Length | Source | Destination                         | Summary                   |
|-----------|-----|--------|--------|-------------------------------------|---------------------------|
| 0.000323  | 1   | -48    | 10     | 00:19:D2:2A:04:DB                   | 802.11 acknowledgement    |
| 0.001142  | 1   | -35    | 28     | 00:19:D2:2A:04:DB 00:1C:A8:4A:54:BD | 802.11 unknown data frame |
| 0.000323  | 1   | -50    | 10     | 00:19:D2:2A:04:DB                   | 802.11 acknowledgement    |
| 0.096540  | 1   | -53    | 141    | 00:1C:A8:4A:54:BD 00:1C:A8:10:00:11 | 802.11 encrypted data     |
| 0.000007  | 1   | -72    | 10     | 00:1C:A8:4A:54:BD                   | 802.11 acknowledgement    |
| 0.003619  | 1   | -48    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.102437  | 2   | -50    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.102405  | 2   | -50    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.102456  | 2   | -49    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.204866  | 3   | -56    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.003429  | 3   | -57    | 153    | 00:1C:A8:4A:54:BD 00:19:D2:2A:04:DB | 802.11 probe response     |
| 0.002577  | 3   | -58    | 153    | 00:1C:A8:4A:54:BD 00:19:D2:2A:04:DB | 802.11 probe response     |
| 0.043756  | 3   | -77    | 64     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.000708  | 3   | -76    | 51     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.014730  | 3   | -35    | 64     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.000738  | 3   | -35    | 51     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.006957  | 3   | -35    | 64     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.000700  | 3   | -35    | 51     | 00:19:D2:2A:04:DB FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 probe request      |
| 0.028892  | 3   | -58    | 159    | 00:1C:A8:4A:54:BD FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.307850  | 4   | -85    | 28     | 00:19:D2:2A:04:DB 00:1C:A8:4A:54:BD | 802.11 unknown data frame |
| 0.359355  | 6   | -92    | 93     | 00:17:9A:B7:0C:1E FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.102432  | 6   | -91    | 93     | 00:17:9A:B7:0C:1E FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.014740  | 6   | -91    | 95     | 00:02:CF:87:AA:AE FF:FF:FF:FF:FF:FF | 802.11 beacon             |
| 0.035659  | 6   | -95    | 28     | 00:19:D2:2A:04:DB 00:1C:A8:4A:54:BD | 802.11 unknown data frame |
| 0.706875  | 8   | -83    | 28     | A7:42:3E:04:7A:F1 C0:BF:FB:CD:1E:E8 | 802.11 unknown data frame |
| 0.000302  | 8   | -90    | 10     | 00:19:D2:2A:04:DB                   | 802.11 acknowledgement    |
| 0.112372  | 9   | -79    | 28     | 00:19:D2:2A:04:DB 00:1C:A8:4A:54:BD | 802.11 unknown data frame |
| 0.000496  | 1   | -35    | 28     | 00:19:D2:2A:04:DB                   | 802.11 unknown data frame |

Scan 9 Start Channel Infrastructure AirWISE Charts Decodes Tools Back

Şekil 4.7: Air Magnet ile paket analizi

İşaret/Gürültü oranı değerini grafiksel olarak göstererek ölçüm sonucunda ortalama değerini sayısal olarak vermektedir.



**Şekil 4.8: Air Magnet ile işaret/gürültü oranı ölçümü**

## Uygulama

Ölçümler sırasında, Intel(R) PRO/1000 PL ethernet kartlı bilgisayar kablosuz erişim noktasına 100Mbps ethernet kablosu ile bağlanmıştır ve bu bilgisayar ölçümler için sunucu olarak konumlandırılmıştır. Cisco Aironet AIR-CB21AG-W-K9 model PCMCIA kartı olan bilgisayar erişim noktasına kablosuz olarak bağlanmış ve net veri hızı ölçümlerinde istemci olarak konumlandırılmıştır.

Ölçümler esnasında temel olarak frekans ve mesafe parametreleri değişken olarak seçilmiştir. Net veri hızı ölçümleri 1, 10, 30, 40 .... 290 metre mesafelerinde her 10 metrede bir gerçekleştirilmiştir. Mesafe ölçümlerinde 100 metrede 3 milimetre yanılma payı olan lazer mesafe ölçer kullanılmıştır. Seçilen her mesafede 13 farklı kanal için net veri hızı ölçümü yapılmış ve sonuçlar grafikler ile birlikte raporlanmıştır. Toplam 390 adet net veri hızı ölçümü (30 farklı mesafede, 13 farklı kanal için) gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2. Net Veri Hızının Ölçülmesi

##### **d=1 metre için**

Çıkış gücü 18dBm olan kablosuz erişim noktası (verici olarak düşünülebilir) ile istemci bilgisayar (alıcı) arasında 1 metre mesafe olduğunda, istemcinin aldığı işaret gücü ( $P_r$ ) Friis formülünden bulunabilir:

$$P_r = P_t (dB) + G_t (dB) + G_r (dB) - P_l (dBm)$$

(H.T. Friis, 1946)

$$P_r = \text{Alıcı gücü}$$

$$P_t = \text{Verici gücü (18 dBm)}$$

$$G_t = \text{Verici anten kazancı (2dBi)}$$

$$G_r = \text{Alıcı anten kazancı (2dBi)}$$

$$P_l = \text{Serbest uzay kaybı [dBm(d)]}$$

$$P_l = \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c} \right)^2$$

$$= \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot 1.2,4}{0,3} \right)^2$$

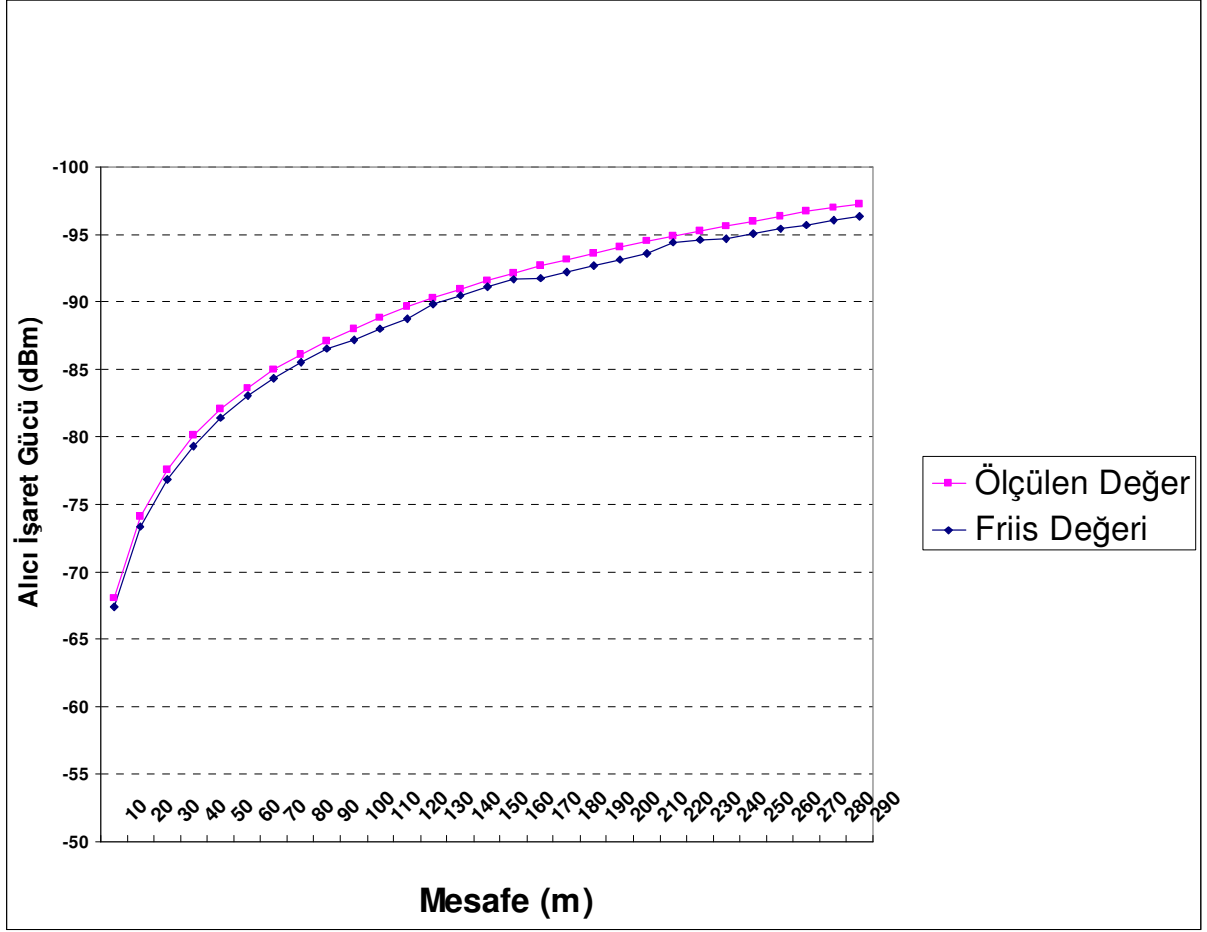
$$PL = 10 \log[ PL / (10^{-3}) ] \text{ dBm}$$

$$= 70 \text{ dBm}$$

$$P_r = 18 + 2 + 2 - 70$$

$$= - 48 \text{ dBm}$$

Aynı ölçümler 10-290 metre mesafeleri arasında her 10 metrede bir tekrar hesaplandığında şekil 4.9'daki grafikte belirtilen değerlere ulaşılır.



**Şekil 4.9: Mesafe/Alıcı güç eşleşmesi**

Farklı mesafelerde istemcide elde ettiğimiz güç seviyeleri dBm cinsinden şekil 4.9’da belirtilmiştir. Şekil 4.9’dan anlaşılabileceği gibi friis formülüyle hesaplanan değer ile uygulama ortamında ölçülen değer arasında farklılıklar vardır. Ölçülen değer friis formülü ile hesaplanan değerden 0,5% ile 1% aralığından değişen oranlarda daha az çıkmıştır. Bu farkın temel nedeni olarak uygulama ortamında serbest uzay kaybının ideal ortamdan farklı olması gösterilebilir. Alıcıda elde edilen sinyal işaret gücü mesafenin karesi ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Her bir mesafe için Şekil 3.9’da gösterilen frekans spectrumundaki bütün kanallar için net veri hızı ölçümleri bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Ölçümlere başlanmadan önce Kalamış Marina’da boş kanal frekans gürültüleri 10 farklı zamanda 6 dakika boyunca ölçülmüştür. Boş kanal frekans gürültüsü ölçümlerinin ortalama değerleri Kalamış Marina için tablo 4.1’de listelenmiştir.

| Kanal         | 8    | 7    | 3   | 4   | 10  | 2   | 13  | 5     | 1     | 9     | 12  | 11  | 6   |
|---------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
| Gürültü (dBm) | -100 | -100 | -98 | -96 | -97 | -96 | -96 | -95,5 | -95,5 | -92,5 | -89 | -88 | -85 |

Tablo 4.1: Boş kanal frekans gürültüsü

Sonuçlar farklı mesafelerde işaret gürültü oranı olarak dBm cinsinden tablo 4.2’de listelenmiştir.

| m/Kanal | 2412MHz | 2417MHz | 2422MHz | 2427MHz | 2432MHz | 2437MHz | 2442MHz |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1       | 47,500  | 48,000  | 50,000  | 49,000  | 47,500  | 37,000  | 52,000  |
| 10      | 27,454  | 27,954  | 29,954  | 28,954  | 27,454  | 16,954  | 31,954  |
| 20      | 21,434  | 21,934  | 23,934  | 22,934  | 21,434  | 10,934  | 25,934  |
| 30      | 17,912  | 18,412  | 20,412  | 19,412  | 17,912  | 7,412   | 22,412  |
| 40      | 15,413  | 15,913  | 17,913  | 16,913  | 15,413  | 4,913   | 19,913  |
| 50      | 13,475  | 13,975  | 15,975  | 14,975  | 13,475  | 2,975   | 17,975  |
| 60      | 11,891  | 12,391  | 14,391  | 13,391  | 11,891  | 1,391   | 16,391  |
| 70      | 10,553  | 11,053  | 13,053  | 12,053  | 10,553  | 0,053   | 15,053  |
| 80      | 9,393   | 9,893   | 11,893  | 10,893  | 9,393   | -1,107  | 13,893  |
| 90      | 8,370   | 8,870   | 10,870  | 9,870   | 8,370   | -2,130  | 12,870  |
| 100     | 7,454   | 7,954   | 9,954   | 8,954   | 7,454   | -3,046  | 11,954  |
| 110     | 6,627   | 7,127   | 9,127   | 8,127   | 6,627   | -3,873  | 11,127  |
| 120     | 5,871   | 6,371   | 8,371   | 7,371   | 5,871   | -4,629  | 10,371  |
| 130     | 5,176   | 5,676   | 7,676   | 6,676   | 5,176   | -5,324  | 9,676   |
| 140     | 4,532   | 5,032   | 7,032   | 6,032   | 4,532   | -5,968  | 9,032   |
| 150     | 3,933   | 4,433   | 6,433   | 5,433   | 3,933   | -6,567  | 8,433   |
| 160     | 3,372   | 3,872   | 5,872   | 4,872   | 3,372   | -7,128  | 7,872   |
| 170     | 2,846   | 3,346   | 5,346   | 4,346   | 2,846   | -7,654  | 7,346   |
| 180     | 2,349   | 2,849   | 4,849   | 3,849   | 2,349   | -8,151  | 6,849   |
| 190     | 1,879   | 2,379   | 4,379   | 3,379   | 1,879   | -8,621  | 6,379   |
| 200     | 1,434   | 1,934   | 3,934   | 2,934   | 1,434   | -9,066  | 5,934   |
| 210     | 1,010   | 1,510   | 3,510   | 2,510   | 1,010   | -9,490  | 5,510   |
| 220     | 0,606   | 1,106   | 3,106   | 2,106   | 0,606   | -9,894  | 5,106   |
| 230     | 0,220   | 0,720   | 2,720   | 1,720   | 0,220   | -10,28  | 4,720   |
| 240     | -0,150  | 0,350   | 2,350   | 1,350   | -0,150  | -10,65  | 4,350   |
| 250     | -0,504  | -0,004  | 1,996   | 0,996   | -0,504  | -11,004 | 3,996   |
| 260     | -0,845  | -0,345  | 1,655   | 0,655   | -0,845  | -11,345 | 3,655   |
| 270     | -1,173  | -0,673  | 1,327   | 0,327   | -1,173  | -11,673 | 3,327   |
| 280     | -1,489  | -0,989  | 1,011   | 0,011   | -1,489  | -11,989 | 3,011   |
| 290     | -1,793  | -1,293  | 0,707   | -0,293  | -1,793  | -12,293 | 2,707   |

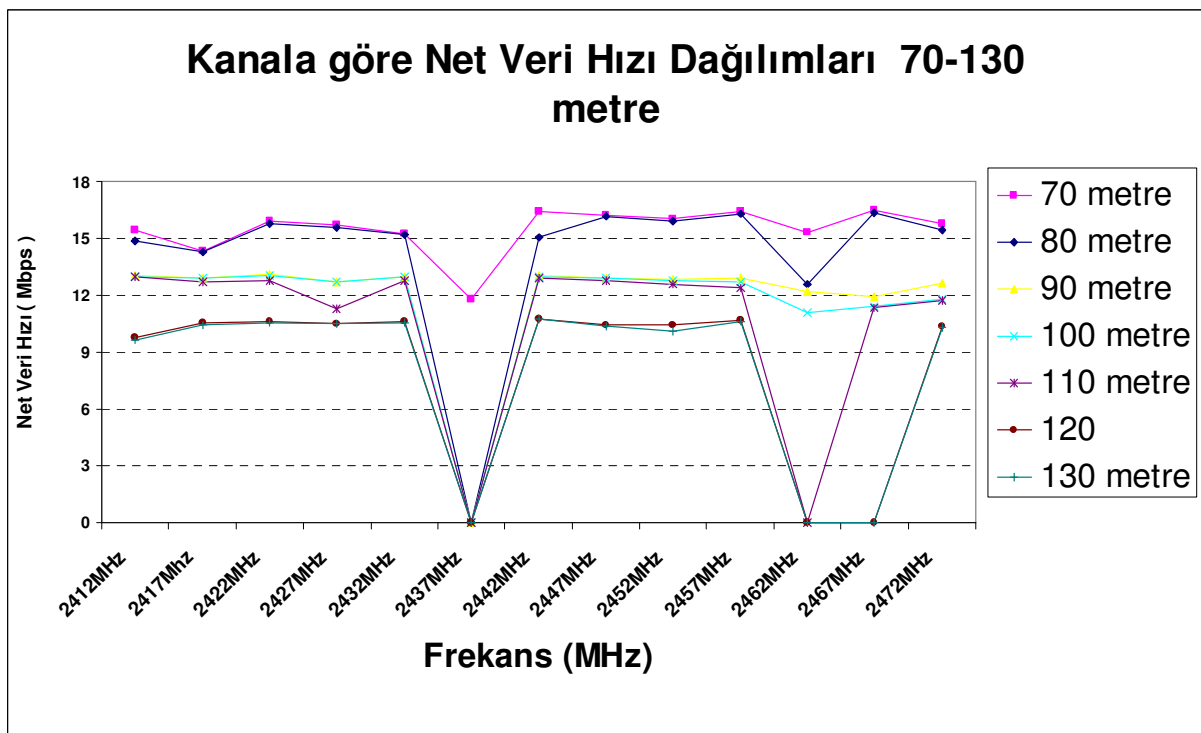
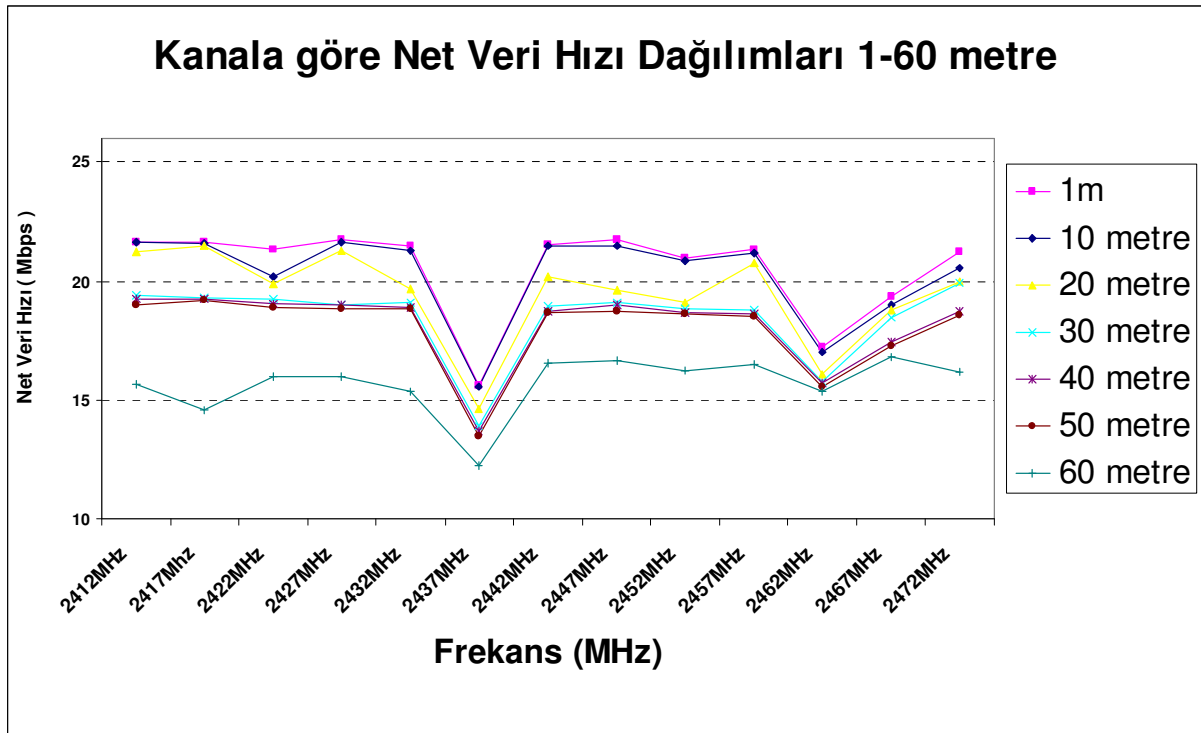
Tablo 4.2: Mesafe SNR değişimleri (2412-2442 MHz)

| m/Kanal | 2447MHz | 2452MHz | 2457MHz | 2462MHz | 2467MHz | 2472MHz |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1       | 52,000  | 44,500  | 49,000  | 40,000  | 41,000  | 47,500  |
| 10      | 31,954  | 24,454  | 28,954  | 19,954  | 20,954  | 27,454  |
| 20      | 25,934  | 18,434  | 22,934  | 13,934  | 14,934  | 21,434  |
| 30      | 22,412  | 14,912  | 19,412  | 10,412  | 11,412  | 17,912  |
| 40      | 19,913  | 12,413  | 16,913  | 7,913   | 8,913   | 15,413  |
| 50      | 17,975  | 10,475  | 14,975  | 5,975   | 6,975   | 13,475  |

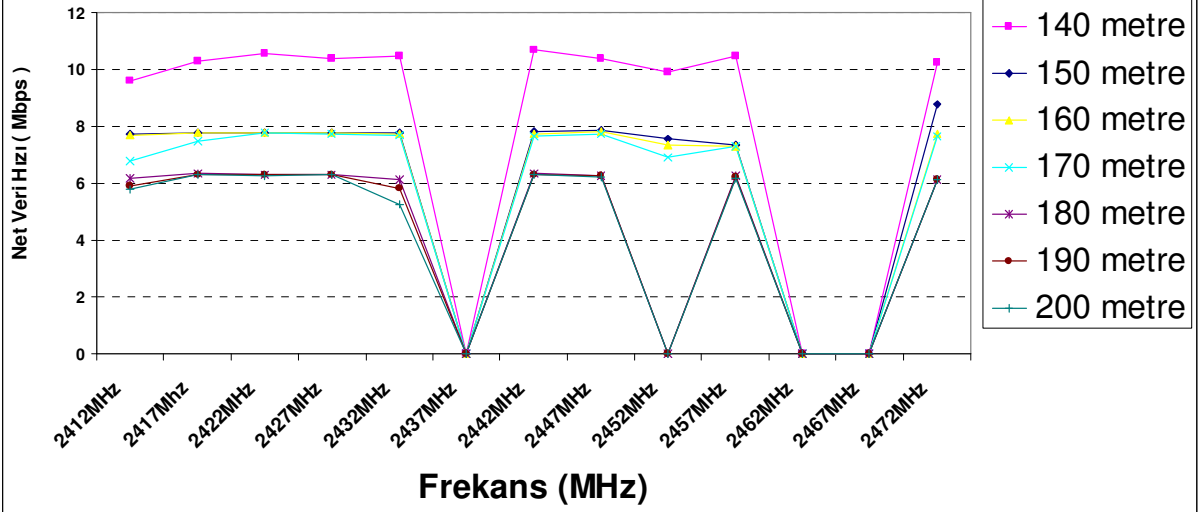
|     |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 60  | 16,391 | 8,891  | 13,391 | 4,391  | 5,391  | 11,891 |
| 70  | 15,053 | 7,553  | 12,053 | 3,053  | 4,053  | 10,553 |
| 80  | 13,893 | 6,393  | 10,893 | 1,893  | 2,893  | 9,393  |
| 90  | 12,87  | 5,370  | 9,870  | 0,870  | 1,870  | 8,370  |
| 100 | 11,954 | 4,454  | 8,954  | -0,046 | 0,954  | 7,454  |
| 110 | 11,127 | 3,627  | 8,127  | -0,873 | 0,127  | 6,627  |
| 120 | 10,371 | 2,871  | 7,371  | -1,629 | -0,629 | 5,871  |
| 130 | 9,676  | 2,176  | 6,676  | -2,324 | -1,324 | 5,176  |
| 140 | 9,032  | 1,532  | 6,032  | -2,968 | -1,968 | 4,532  |
| 150 | 8,433  | 0,933  | 5,433  | -3,567 | -2,567 | 3,933  |
| 160 | 7,872  | 0,372  | 4,872  | -4,128 | -3,128 | 3,372  |
| 170 | 7,346  | -0,154 | 4,346  | -4,654 | -3,654 | 2,846  |
| 180 | 6,849  | -0,651 | 3,849  | -5,151 | -4,151 | 2,349  |
| 190 | 6,379  | -1,121 | 3,379  | -5,621 | -4,621 | 1,879  |
| 200 | 5,934  | -1,566 | 2,934  | -6,066 | -5,066 | 1,434  |
| 210 | 5,510  | -1,990 | 2,510  | -6,490 | -5,490 | 1,010  |
| 220 | 5,106  | -2,394 | 2,106  | -6,894 | -5,894 | 0,606  |
| 230 | 4,720  | -2,780 | 1,720  | -7,280 | -6,280 | 0,220  |
| 240 | 4,350  | -3,150 | 1,350  | -7,650 | -6,650 | -0,150 |
| 250 | 3,996  | -3,504 | 0,996  | -8,004 | -7,004 | -0,504 |
| 260 | 3,655  | -3,845 | 0,655  | -8,345 | -7,345 | -0,845 |
| 270 | 3,327  | -4,173 | 0,327  | -8,673 | -7,673 | -1,173 |
| 280 | 3,011  | -4,489 | 0,011  | -8,989 | -7,989 | -1,489 |
| 290 | 2,707  | -4,793 | -0,293 | -9,293 | -8,293 | -1,793 |

**Tablo 4.3: Mesafe SNR değişimleri (2447-2472 MHz)**

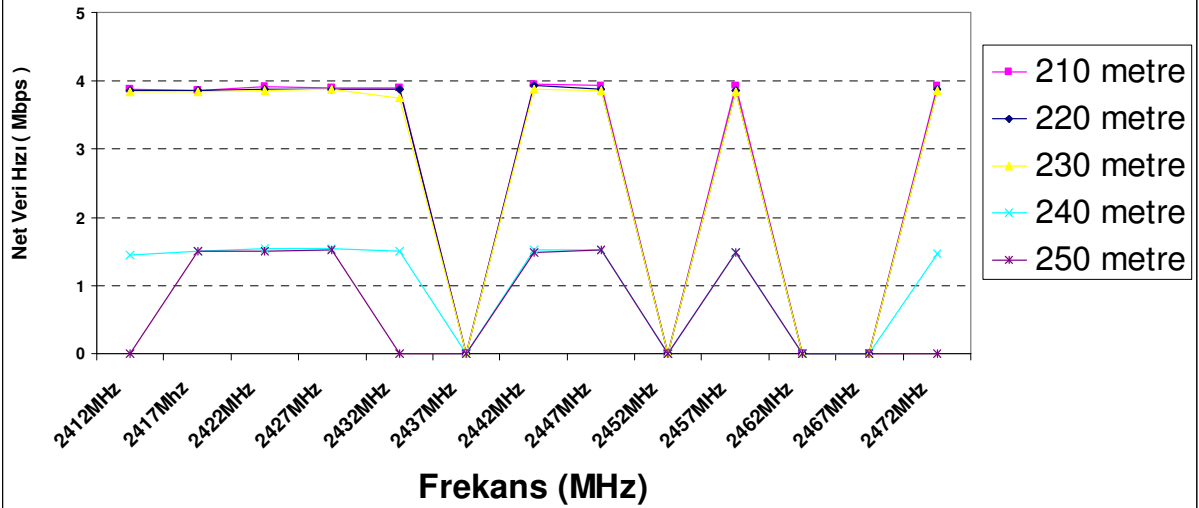
Bu koşullar altında 10 metre aralıklar ile 13 farklı frekans için net veri hızı ölçümleri tekrarlanmıştır. Ölçümlerin kırılım gösterdiği mesafelere göre grupladığımızda aşağıdaki grafiklere ulaşırız.

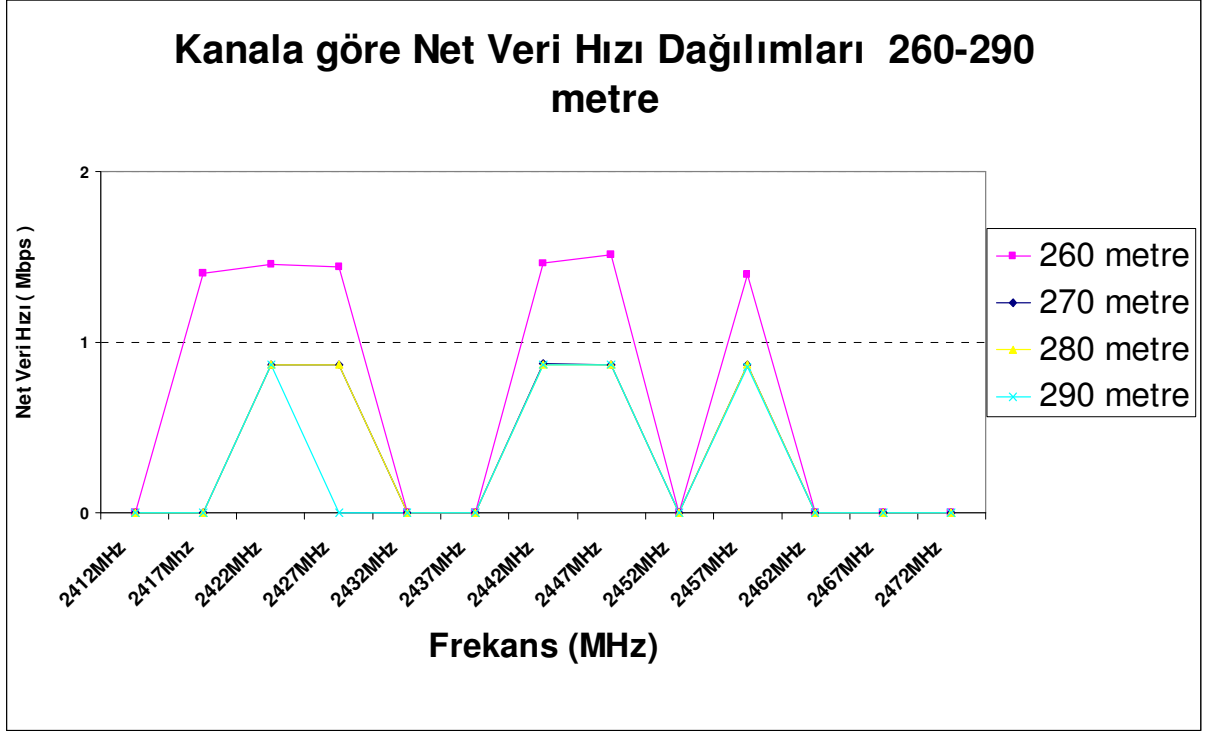


### Kanala göre Net Veri Hızı Dağılımları 140-200 metre



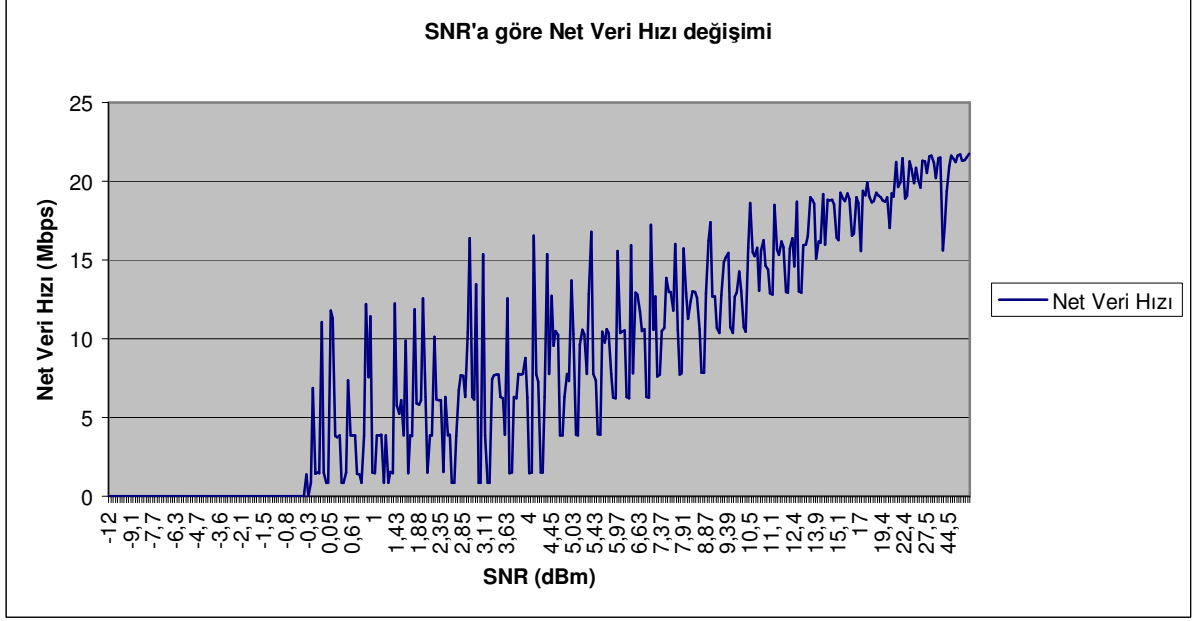
### Kanala göre Net Veri Hızı Dağılımları 210-250 metre





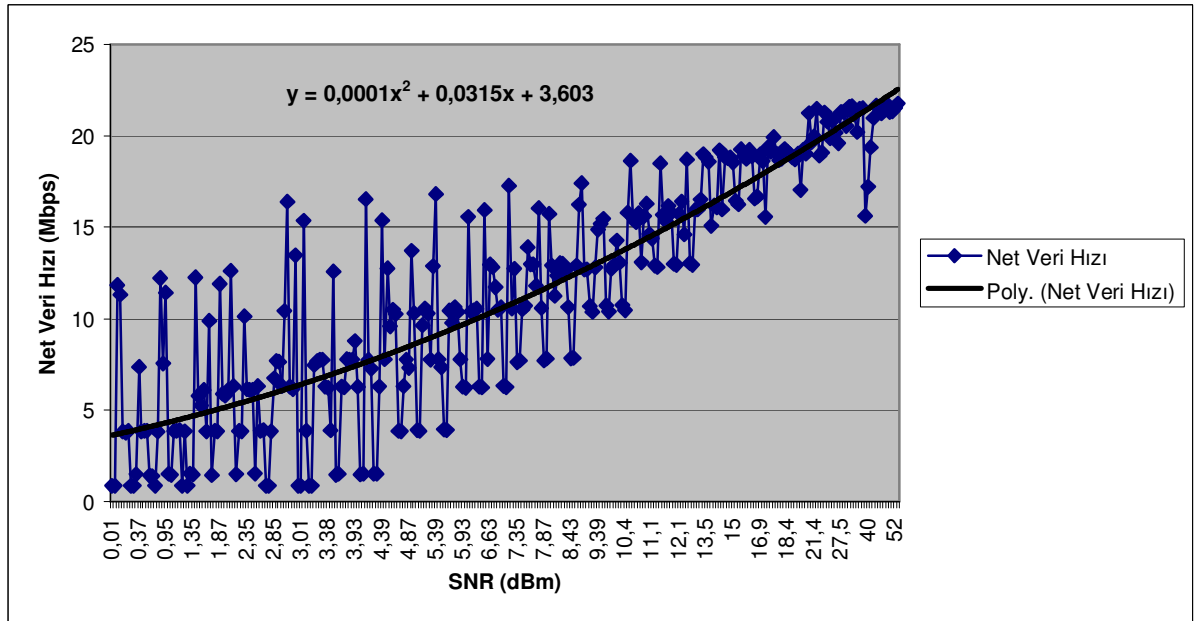
Net veri hızı ölçümlerin ekran görüntüleri ve sonuçları, tez dökümanının sonunda bulunan “Ekler” bölümünde yer almaktadır. 290 metre mesafede, hücre sınır koşullarında, 1 Mbps’ın altında net veri hızı değerleri ölçüldüğü gözlemlenmektedir.

Yapılan ölçümlere dayanarak net veri hızının SNR’a göre değişimi incelendiğinde Şekil 4.10’daki grafiğe ulaşılmaktadır.



Şekil 4.10 Net veri hızının SNR'a göre değişimi

SNR ve net veri hızı ölçüm sonuçlarını kullanarak eğri eşleştirme (curve fitting) algoritmaları uygulandığında, net veri hızı ve SNR arasında matematiksel bir modelleme çıkarmak mümkün olmaktadır. Net veri hızını SNR değeri üzerinden elde etmek için kullanılan eğri eşleme algoritması sonucunda Şekil 4.11'de gösterilen eşitliğe ulaşılır. Bu eşitlik SNR'ın pozitif olduğu değerlerde kullanılabilir.



Şekil 4.11 SNR – Net veri hızı eğri eşleme

Ölçüm değerleri ile en uyumlu sonuca, polinomal eğri eşleme algoritması kullanıldığında ulaşılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan ölçümlere dayanarak, SNR girildiğinde net veri hızını hesaplayan aşağıdaki modele ulaşılmıştır.

$$\text{Net Veri Hızı} = \{ [\text{SNR(dBm)}]^2 \times 10^{-4} \} + \{ [\text{SNR(dBm)}] \times 3,15 \times 10^{-2} \} + 3,603$$

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması ile kablosuz ağlarda şimdiye kadar üzerinde çok fazla çalışma yapılmamış olan net veri hızının incelenmesi ve SNR'a göre modellenmesi amaçlanmıştır. Endüstri de kablosuz ağların band genişliklerinden (802.11b için 11Mbps, 802.11g için 54 Mbps gibi) sıklıkla bahsedilirken, kablosuz ağlarda veri iletişim hızının belirleyen net veri hızı üzerinde fazla durulmadığı gözlemlenmektedir. Paketlerin iletimi endüstride yaygın olarak bahsedilen hızlarda (11 Mbps, 54 Mbps) gerçekleşirken, iletim ortamında (hava) çarpışmadan sakınmak için tanımlanan bekleme süreleri ve kontrol paketlerinin iletimi için harcanan süreler birim zamanda iletilen veri miktarını ve dolayısıyla da net veri hızını düşürmektedir.

Bu çalışma ile kablosuz ağlarda net veri hızının özellikle değişken frekanslar ve mesafeler üzerinde incelenmesi ve modellenmesi amaçlanmaktadır. ISM frekans bandında Türkiye'de kullanılan 13 farklı frekans için net veri hızı ölçümleri kablosuz erişim noktasından 1, 10, 20, 30....290 metre mesafelerde (30 farklı mesafe) tekrarlanmış ve 13 farklı frekans için toplamda 390 ölçüm yapılmıştır.

Ölçümler için kablosuz erişim noktasının ve kablosuz istemcinin birbirlerini görebilecekleri İstanbul Kadıköy ilçesinde bulunan Kalamış marina seçilmiştir. Çevrede yansıma yapabilecek yapıların olmaması bu mekanın seçiminde önemli rol oynamıştır. Ölçümler esnasında IEEE tarafından 2008 Şubat ayında yayınlanan IEEE P802.11.2™/D1.01 “Recommended Practice for the Evaluation of 802.11 Wireless Performance” (802.11 Kablosuz performans ölçümlerinde tavsiye edilen pratikler) ölçüm yöntemleri esas alınmıştır. Kablosuz erişim noktasının ve net veri hızı ölçüm araçlarının çalışacağı kablosuz istemcinin konumları (yerden yükseklik, anten açıları vs.) IEEE tarafından belirlenen prosedürlere uygun olarak seçilmiştir.

Ölçümlerin yapılacağı bölgede 10 farklı zamanda 6 dakikalık ölçümler yapılmış ve uygulama ortamındaki açık hava modellenmiştir. Her bir kanal için on farklı zamanda boş kanal frekans gürültüleri frekans spektrum analizörleri yardımı ile ölçülmüş ve desibel cinsinden Tablo 4.1'de listelenmiştir.

Net veri hızı ölçümlerinde endüstri'de yaygın olarak kullanılan, farklı büyüklükte paketler üreterek bu paketlerin akışını sağlayan ve net veri hızını ölçen Net IQ Chariot programından

yararlanılmıştır. Her bir net veri hızı ölçümü 6 dakika süreyle yapılmış ve 6 dakika sonunda ortalama net veri hızı Mbps cinsinden hesaplamalarda kullanılmıştır.

Bu ölçümler sonucunda işaret sinyal gücünün gürültü gücüne oranının (SNR), net veri hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşaret sinyal gücü, mesafenin karesi ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Sabit mesafelerde, girişimin yüksek olduğu kanallarda net veri hızının daha düşük değerlerde ölçüldüğü gözlemlenmiştir. Girişim arttıkça haberleşme ortamında paket kayıpları artmaktadır. Paket kayıpları sonucunda 802.11 kablosuz ağlarında ACK mesajı alınmaz ve kaybolan paketlerin tekrar iletimi gerçekleştirilir. Tekrar iletimler sonucunda birim zamanda iletilen veri miktarı dolayısıyla net veri hızı azalmaktadır.

Tez dökümanının sonunda yer alan EKLER bölümünde “Ek 4 SNR / Net Veri Hızı” tablosunda, yapılan ölçümlere dayanarak, net veri hızının SNR değerine göre değişimi gösterilmektedir.

Net veri hızının SNR’a göre değişimini gösteren Şekil 4.11’den de anlaşılabileceği üzere gürültü gücünün işaret gücünden fazla olduğu bölgelerde haberleşme gerçekleşmemektedir ve net veri hızı sıfır çıkmaktadır. Ekler bölüm 3’te görüldüğü üzere boş kanal gürültü gücünün, sinyal işaret gücünden yüksek olduğu bu durumlarda, kablosuz istemcinin kablosuz erişim noktası cihazına bağlantı sağlayamadığı ve kablosuz haberleşme bağlantısının kurulamadığı gözlemlenmiştir. Mesafe ve tüm diğer ortam şartlarını aynı tutmak kaydıyla, haberleşme sisteminin girişimin daha az olduğu farklı bir frekansa geçirilmesi ile bağlantı sağlanabildiği ölçümler esnasında gözlemlenmiştir.

Bölüm 4.2’deki ölçüm sonuçları üzerinden eğri eşleme algoritmalarından yararlanarak net veri hızı ve SNR arasında matematiksel bir modellemeye ulaşılabilmektedir. Şekil 4.11’deki bu modelleme:

- 13 farklı frekans için (frekansın farklı olması SNR değerindeki boş kanal gürültü gücünü etkilemektedir),
- 30 farklı mesafede (mesafenin değişmesi SNR değerinde işaret gücünü etkilemektedir)

yapılan toplam 390 ölçüme dayandırılmaktadır.

Teknolojinin her geçen gün ivmelendiği ve hareketli (mobil) yaşama giderek daha fazla ihtiyaç duyduğumuz bir dünyada kablosuz ağların hem ev yaşantımızda hem de endüstride çok yaygın olarak kullanılması kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu sıklıkla kullanılan kablosuz erişim

noktalarının 83 MHz'lik (2400-2483 MHz) bir frekans aralığında çalıştıkları düşünülürse, bulunduğumuz alanda 2,4GHz frekans bandında kanalın başka cihazlar tarafından kullanılması çok olası bir hal almaktadır. Aynı frekansda çalışan cihazların sayıları arttıkça bu frekanslarda girişim artmaktadır. 13 farklı frekans için yapılan ölçümler doğru kanal seçiminin kablosuz ağlar üzerindeki performans artışını açıkça göstermektedir. EK3 d=1 metre grafiğinde görüldüğü üzere, 1 metre mesafede yapılan ölçümlerde 8. kanalda net veri hızı 21,759Mbps iken aynı mesafede girişimin daha yüksek olduğu 6. kanalda net veri hızı 15,62Mbps olarak ölçülmüştür. Mesafe sabit tutulmak kaydıyla, kablosuz ağın çalıştığı frekans iyi optimize edilir ve sistemin doğru frekans'da çalışması sağlanırsa, net veri hızının 29%'lara varan oranlarda arttırılabileceği bu ölçümlerden anlaşılabilmektedir.

Kablosuz ağlarda net veri hızı üzerinde önemli etmenlerden birinin de mesafe olduğu görülmektedir. Frekansı sabit tutmak kaydıyla alıcı noktadaki sinyal gücünü arttırmanın kablosuz ağdaki net veri hızını arttırabileceği yine bu ölçümlerden anlaşılmaktadır. Örneğin 2447MHz frekansında 10 metre mesafede alıcı noktadaki sinyal gücümüz -68dBm iken, 150 metre mesafede bu değer -92dBm'e gerilemektedir. Bu durumda net veri hızı ise 21,498Mbps değerinden 7,852 Mbps değerine düşmektedir. Günümüzde internet hızının 10Mbps'lara ulaştığı düşünüldüğünde kablosuz yerel alan ağında (WLAN) alınan sinyal gücünü yüksek tutma gerekliliği açıktır. Friis formülünden de anlaşılabileceği üzere, frekans sabit tutulmak üzere, alıcıdaki sinyal gücünü arttırmak için verici gücü, verici ve alıcı anten kazançları değerlerini arttırmak gerekmektedir. Erişim noktası cihazlarında daha yüksek kazançlı sahip antenler kullanmak uygulama kolaylığı açısından tercih edilmektedir.

**KAYNAKLAR**

- [1] IEEE “P802.11.2™/D1.01. Draft Recommended Practice for the Evaluation of 802.11 Wireless Performance”, 2008
- [2] IEEE Standards Department, “P802.11n™/D2.00”, 2007
- [3] IEEE Standards Department 802.11b, “Supplement to 802.11-1999, Wireless LAN MAC and PHY specifications: Higher speed Physical Layer (PHY) extension in the 2.4 GHz band”, 1999
- [4] IEEE Standards Department, “Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”, IEEE standard 802.11, 1997
- [5] Juha Villanen, “802.11 a/g OFDM PHY”, 2003
- [6] O’Hara, Bob, Petrick, Al, “IEEE 802.11 Handbook- A Designer’s Companion”, IEEE Press, 1999
- [7] Pablo Brenner, “A Technical Tutorial on the IEEE 802.11 Protocol”, BreezeCom Wireless Communications, 1997
- [8] Qixiang Pang, Soung C. Liew, Victor C.M. Leung “Performance Improvement of 802.11 Wireless Access Network with TCP ACK Agent and Auto-Zoom Backoff Algorithm”, 2005
- [9] Zhibin Wu, Sachin Ganu, Ivan Seskar and D. Raychaudhuri “Experimental Investigation of PHY Layer Rate Control and Frequency Selection in 802.11-based Ad-Hoc Networks”, 2005

**INTERNET KAYNAKLARI**

- [10] <http://airmagnet.com/>
- [11] <http://ieeexplore.ieee.org>
- [12] <http://en.wikipedia.org>
- [13] <http://www.netiq.com>
- [14] <http://www.54g.org/pdf/802.11g-WP104-RDS1.pdf>

## EKLER

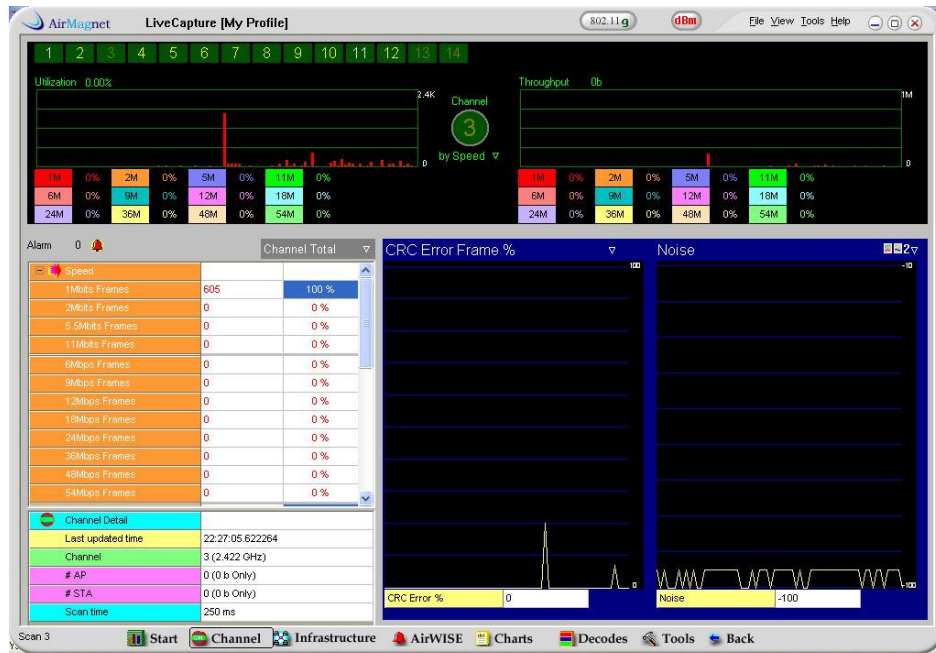
## Ek 1: Uygulama Ortamı Boş Kanal Girişim Değerlerinin Ölçülmesi



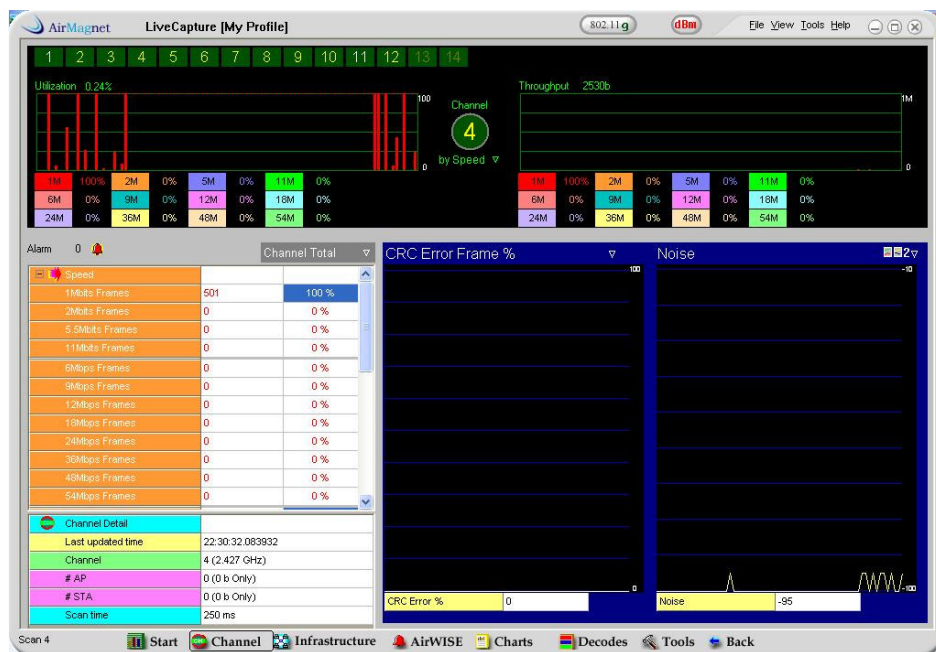
f=2412MHz



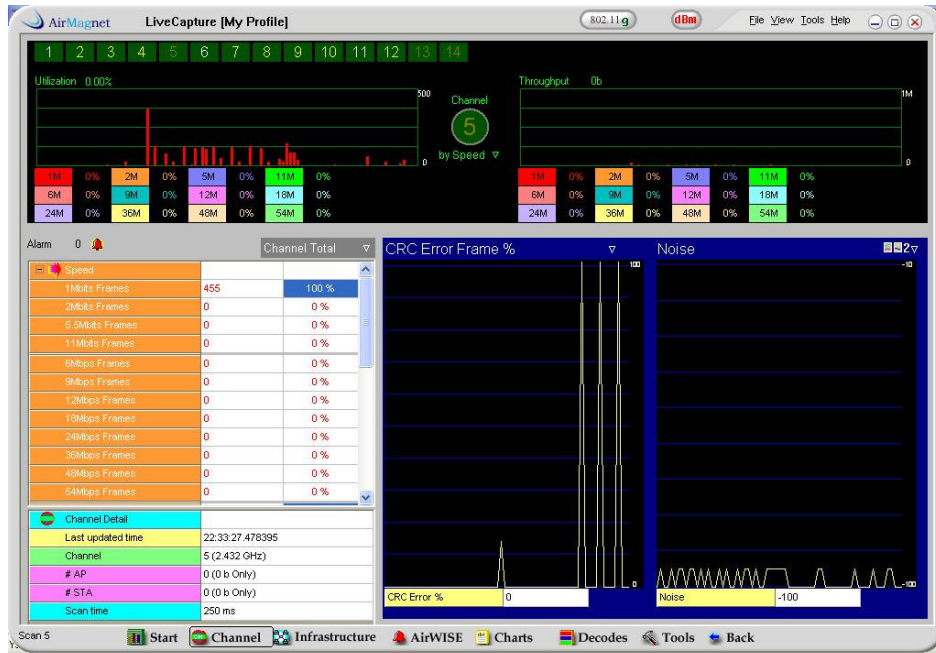
f=2417MHz



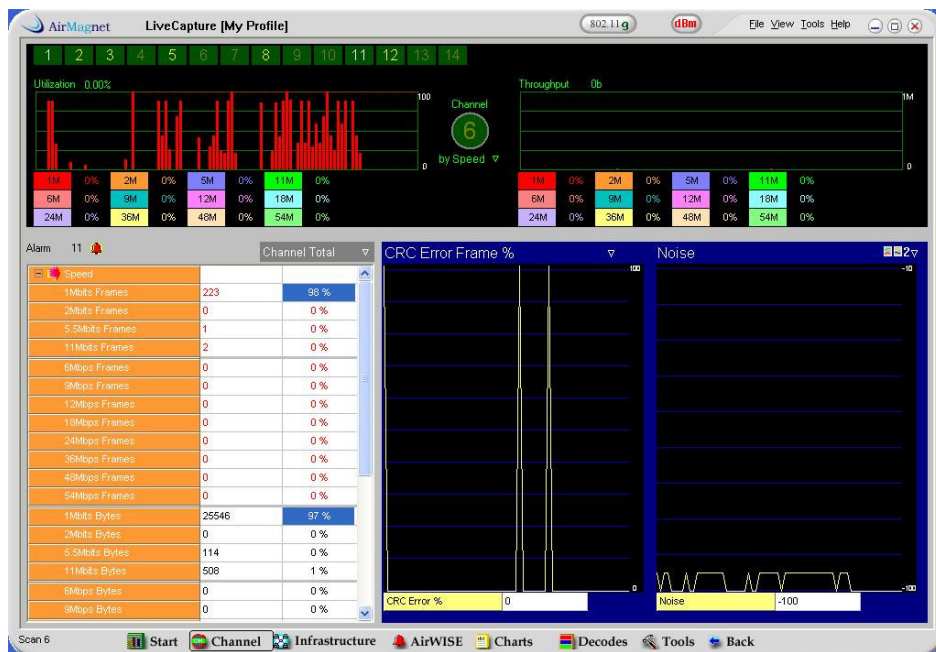
**f=2422MHz**



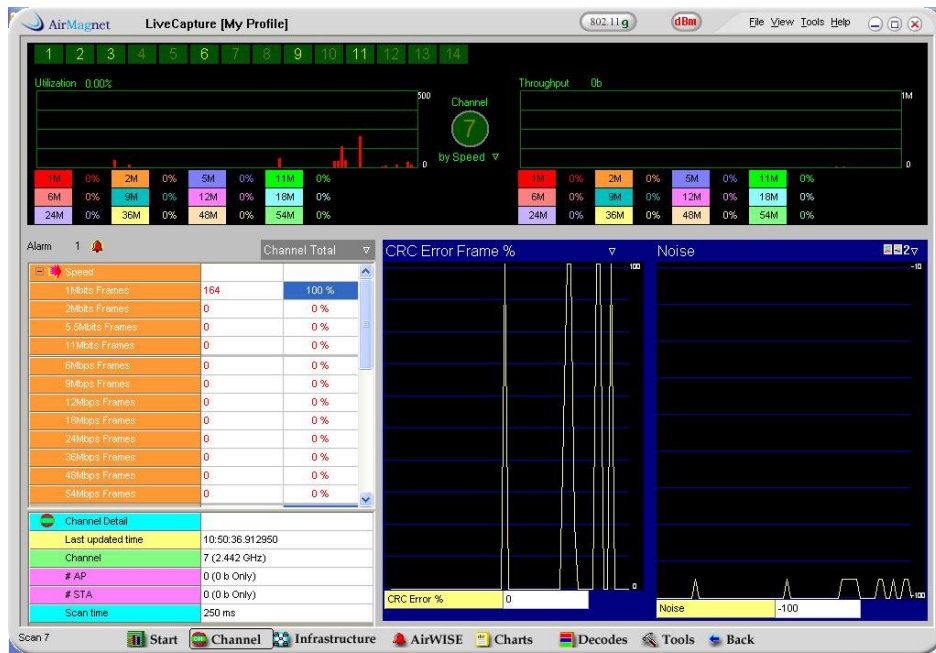
**f=2427MHz**



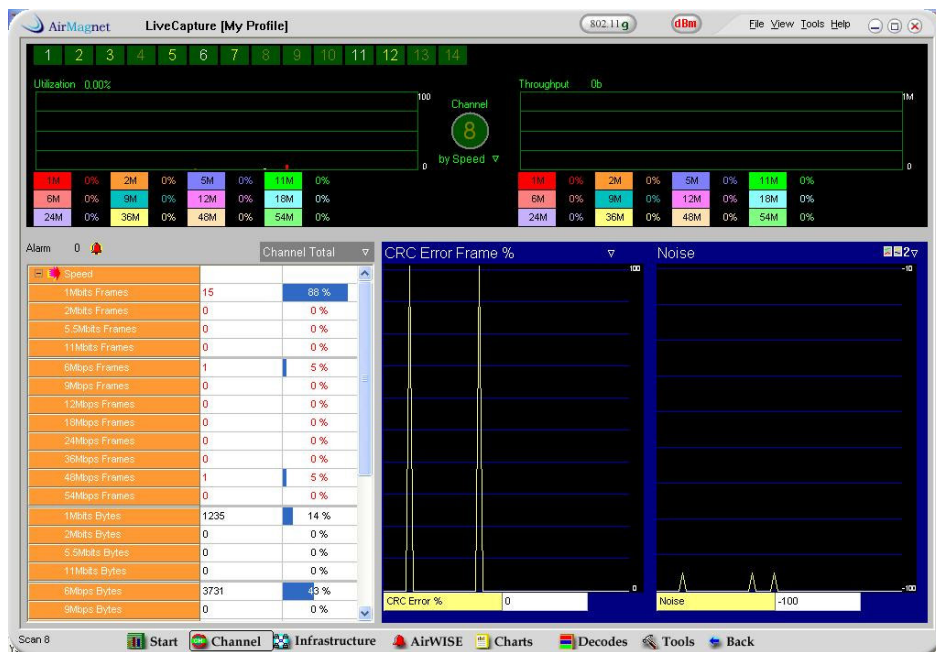
$f=2432\text{MHz}$



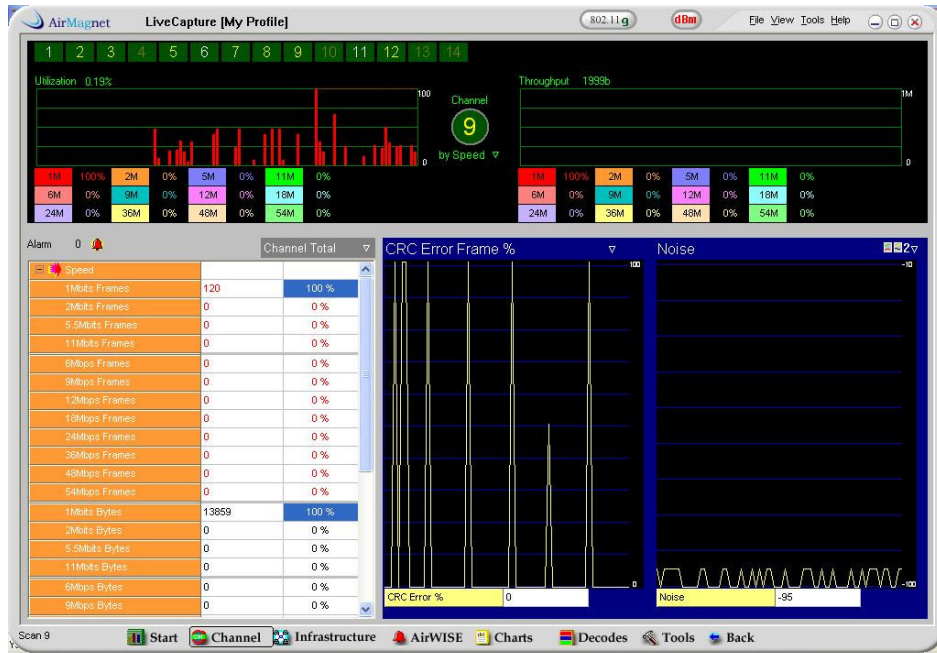
$f=2437\text{MHz}$



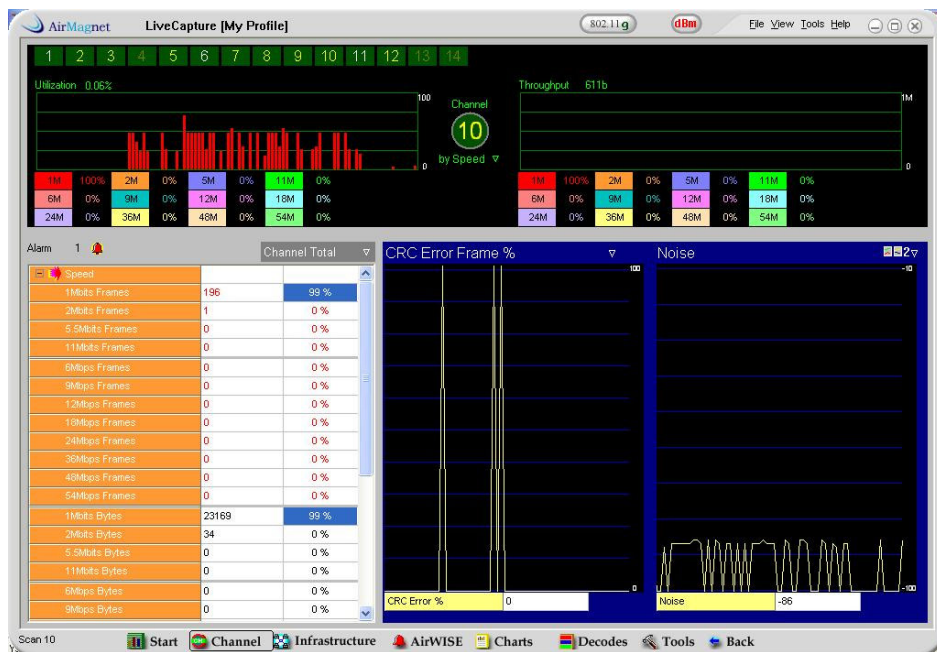
$f=2442\text{MHz}$



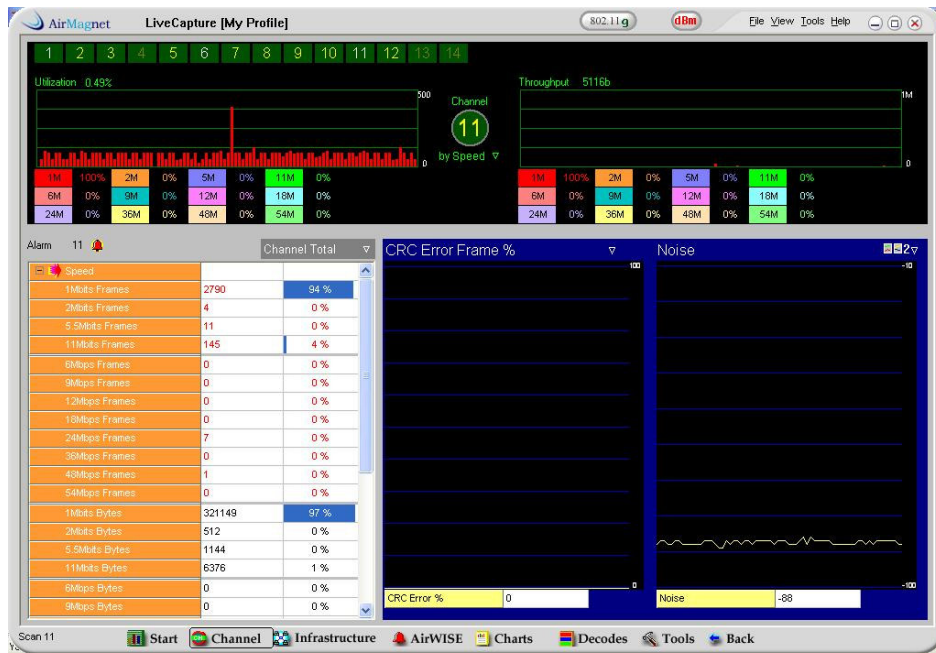
$f=2447\text{MHz}$



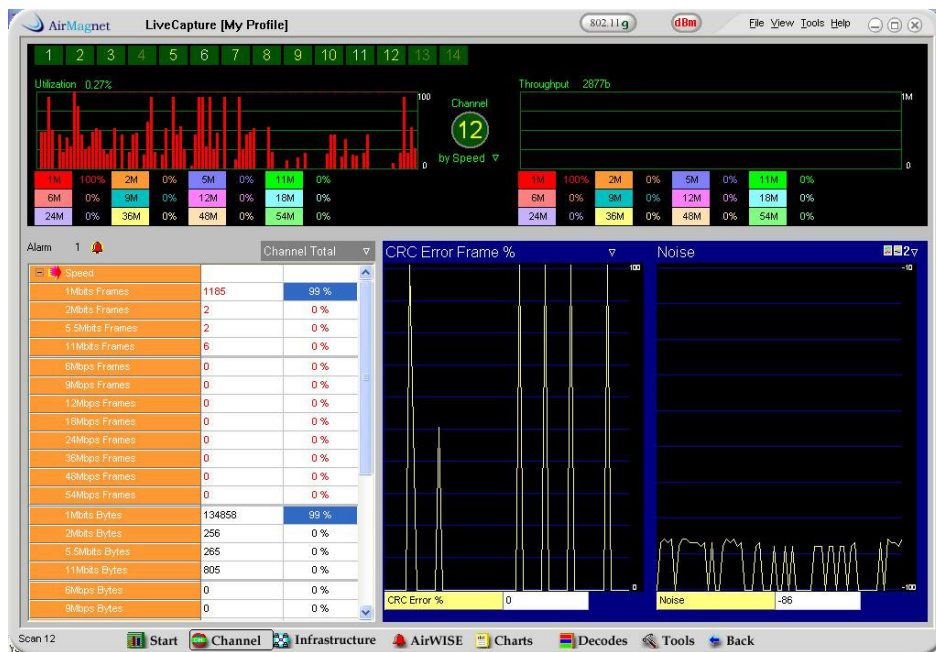
$f=2452\text{MHz}$



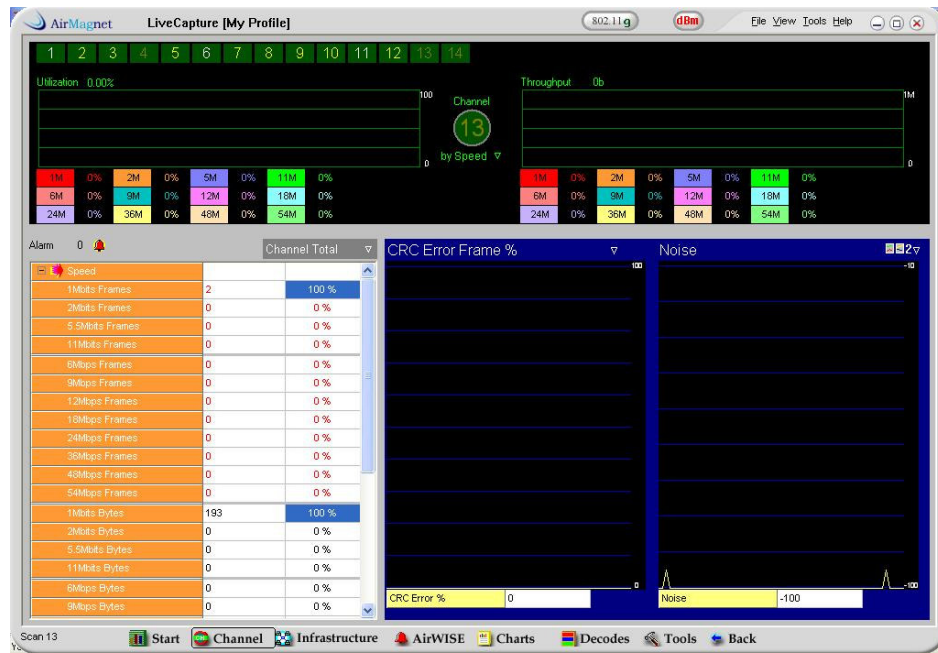
$f=2457\text{MHz}$



$f=2462\text{MHz}$

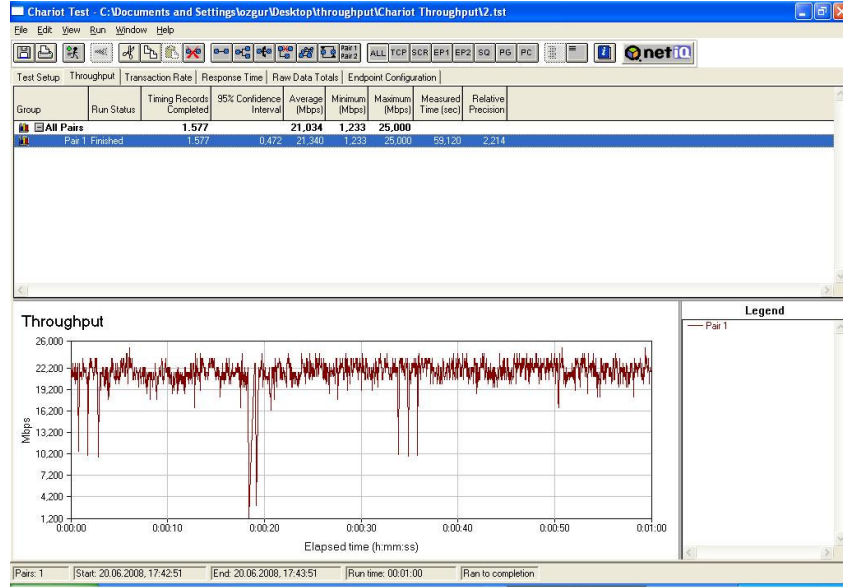


$f=2467\text{MHz}$

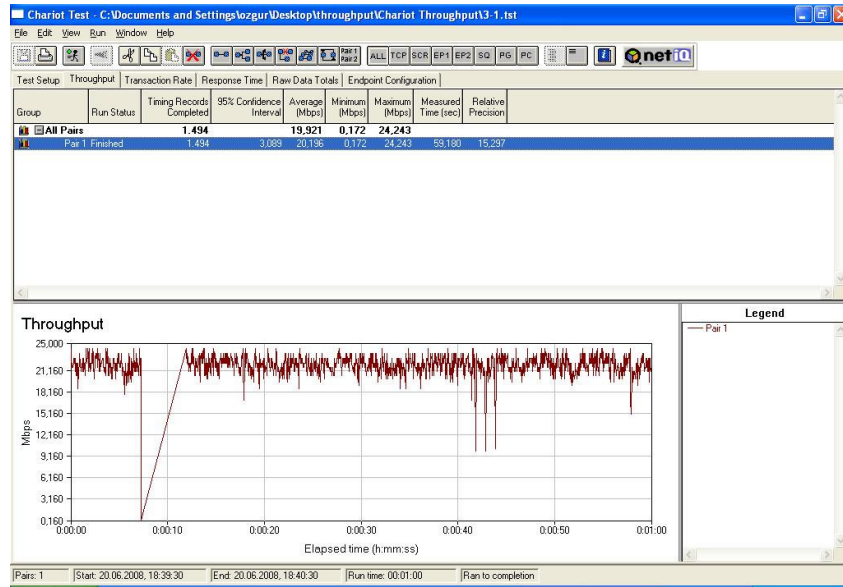


**f=2472MHz**

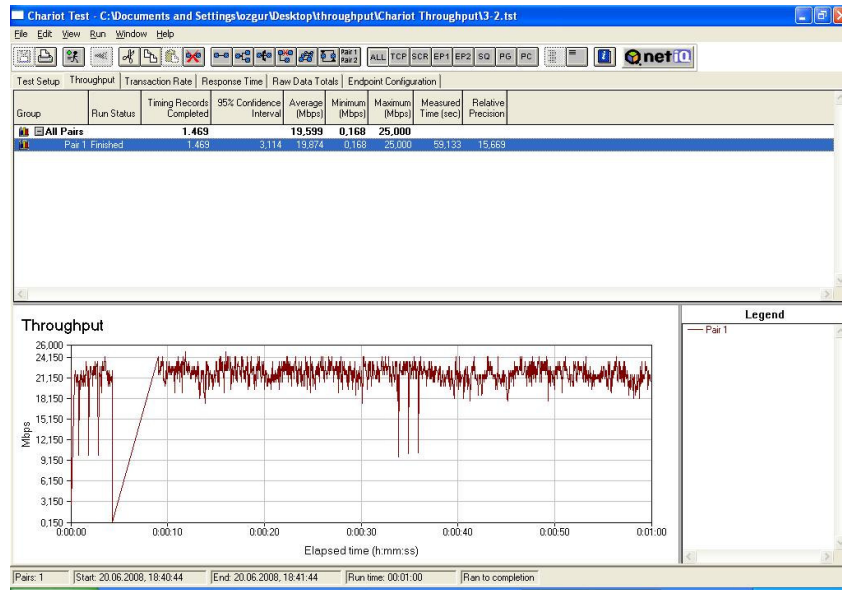
## Ek 2: Net Veri Hızı Ölçümleri ( 2422MHz için)



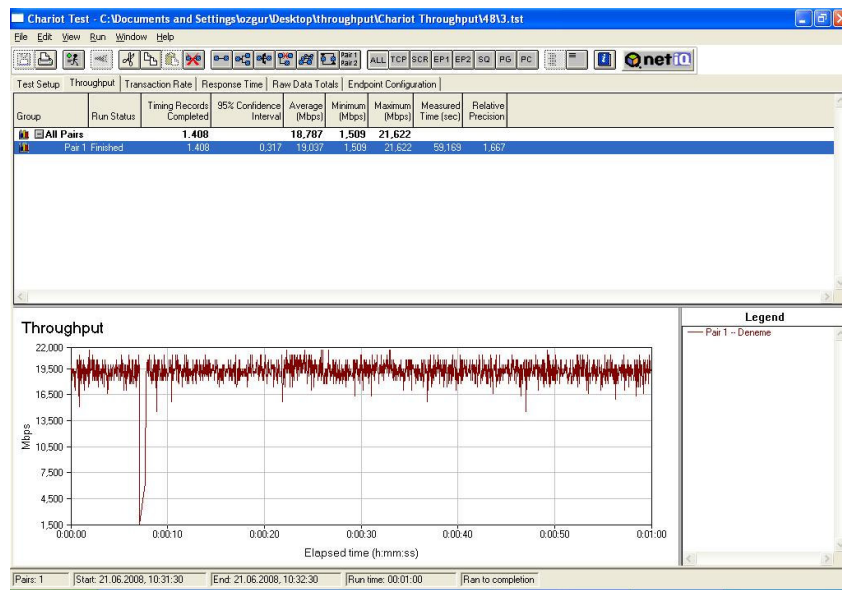
**d=1 metre**



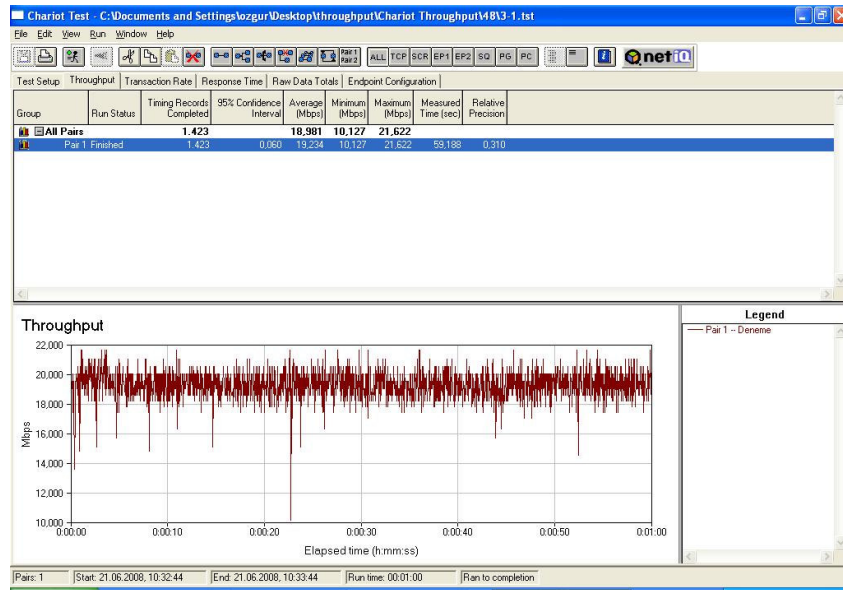
**d=10 metre**



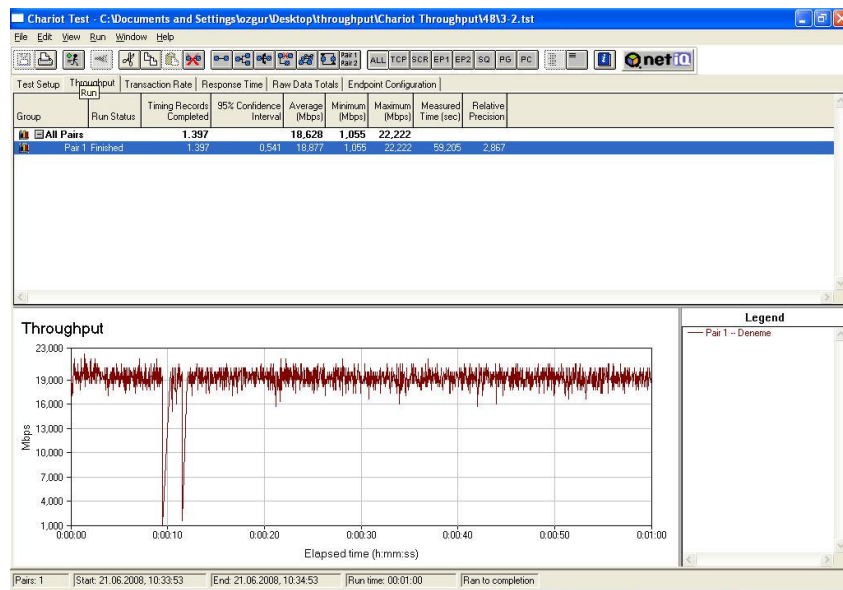
**d=20 metre**



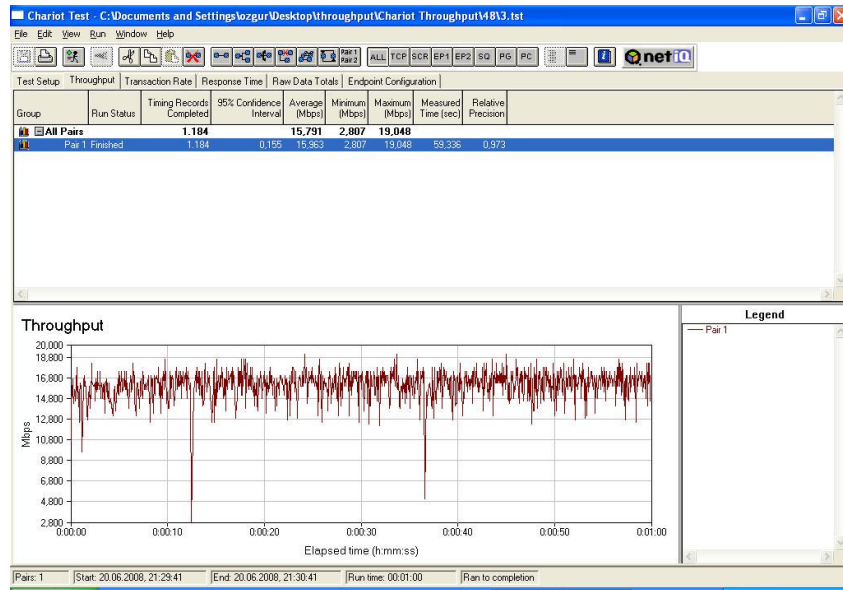
**d=30 metre**



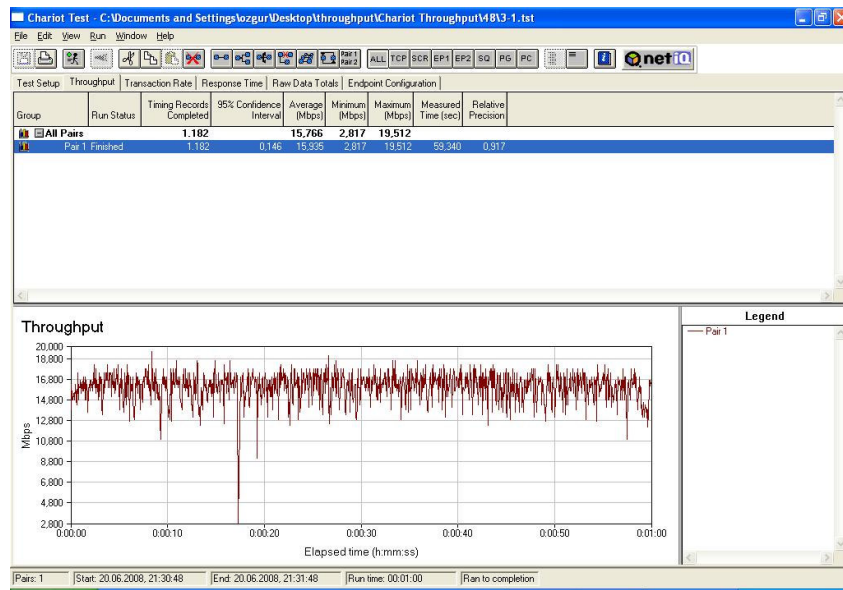
**d=40 metre**



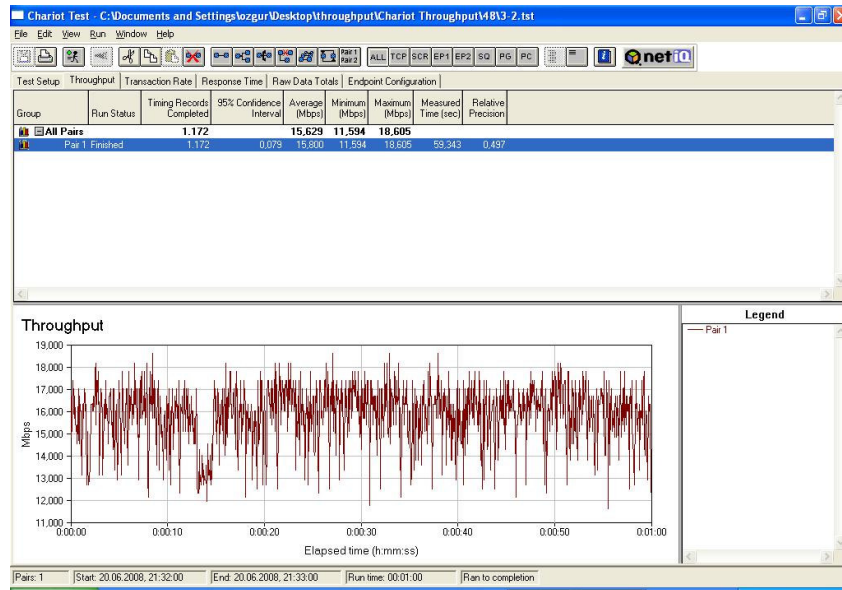
**d=50 metre**



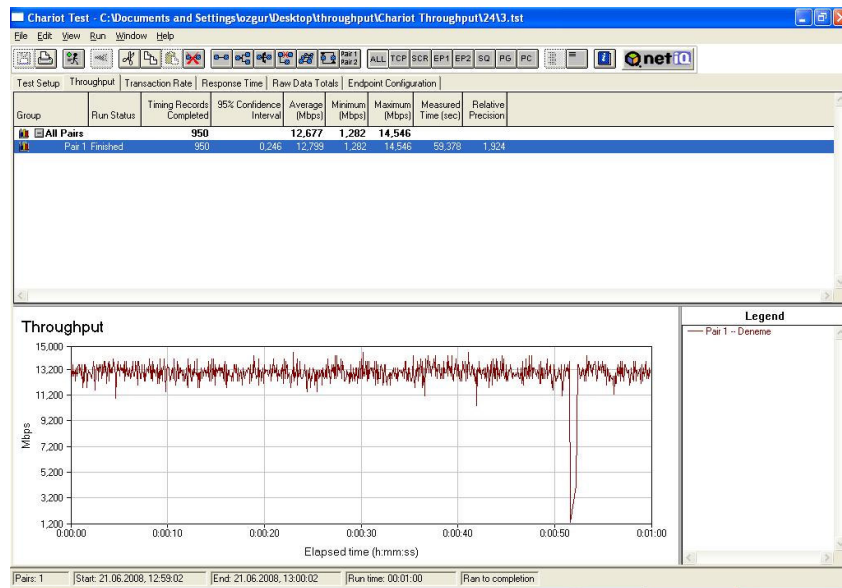
**d=60 metre**



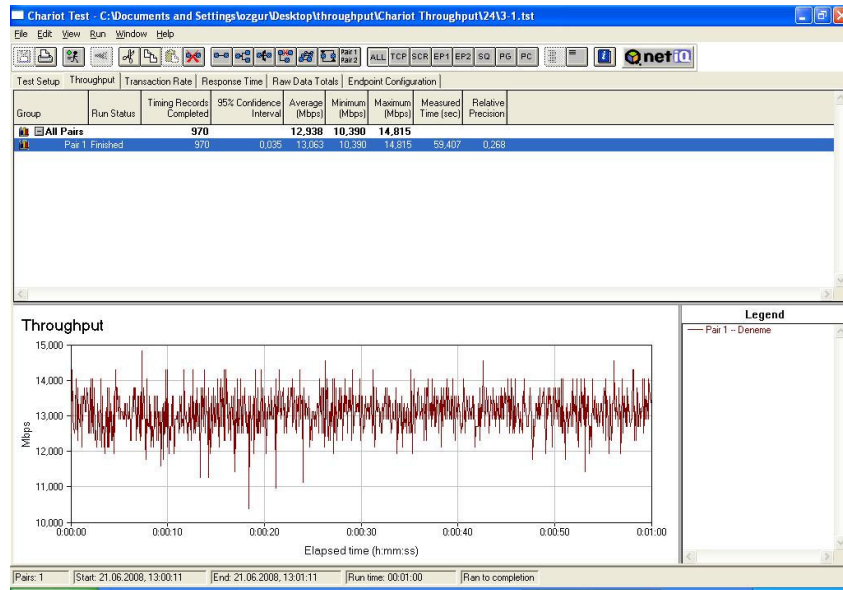
**d=70 metre**



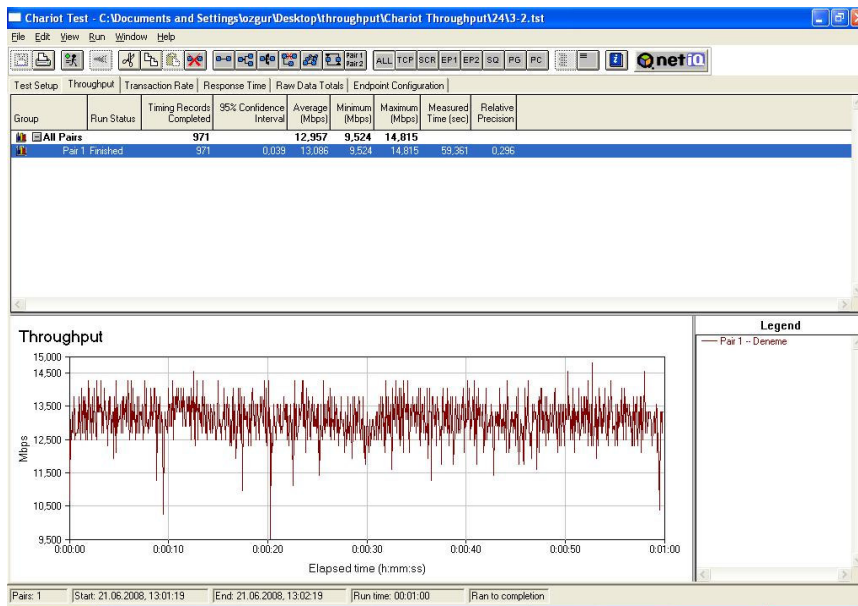
**d=80 metre**



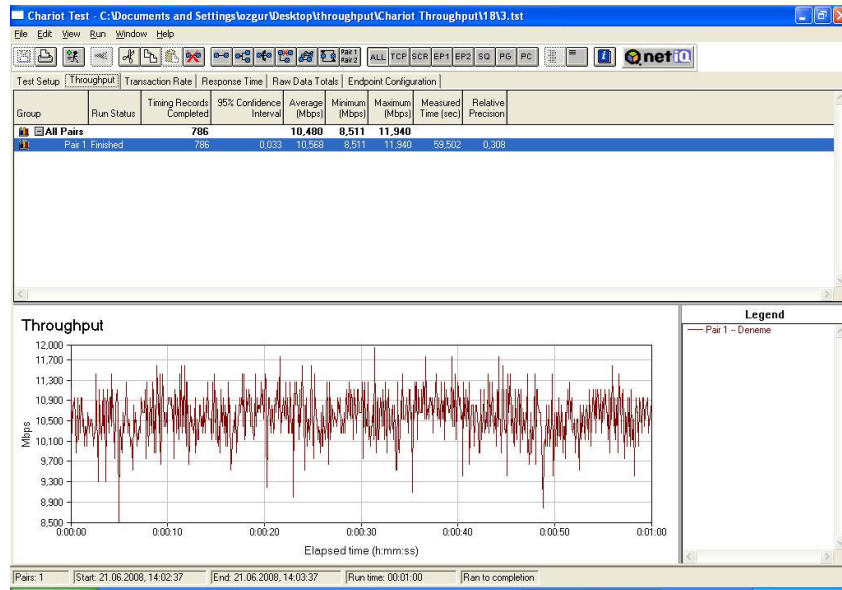
**d=90 metre**



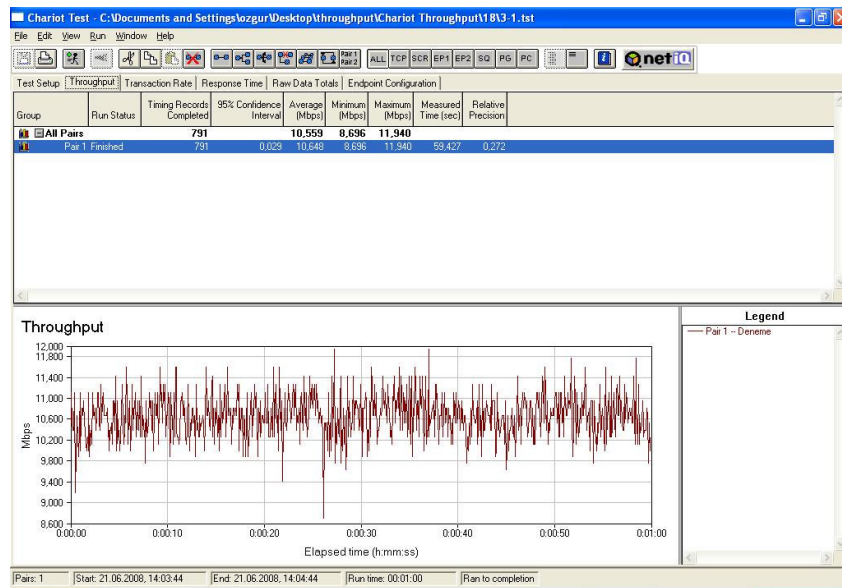
**d=100 metre**



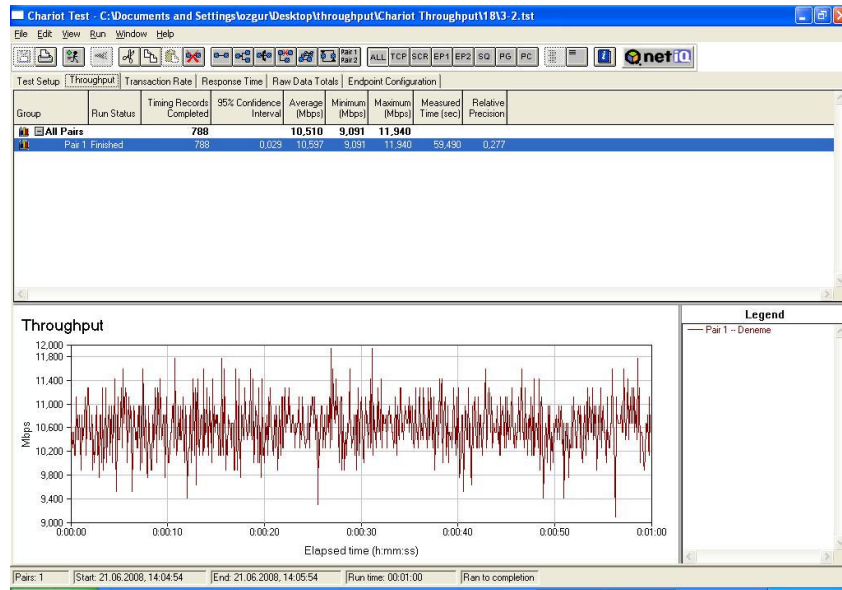
**d=110 metre**



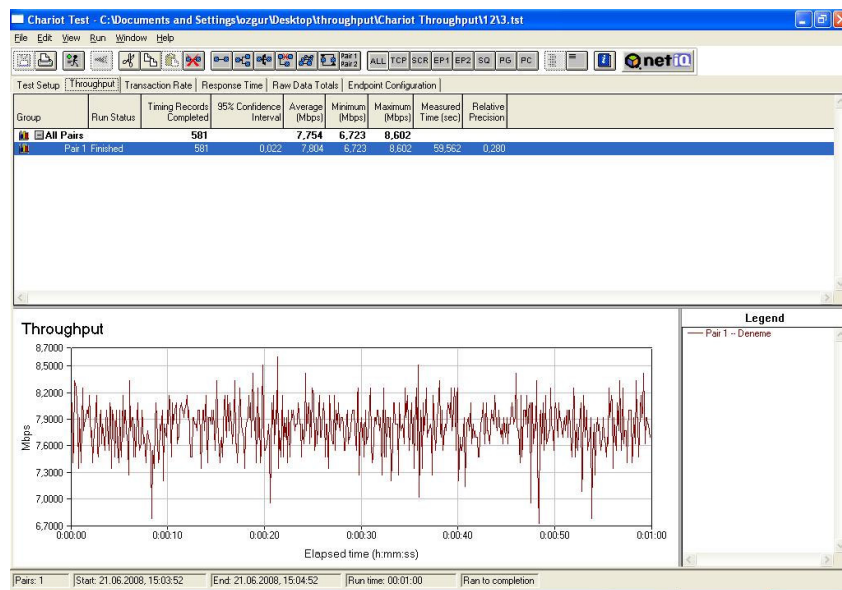
**d=120 metre**



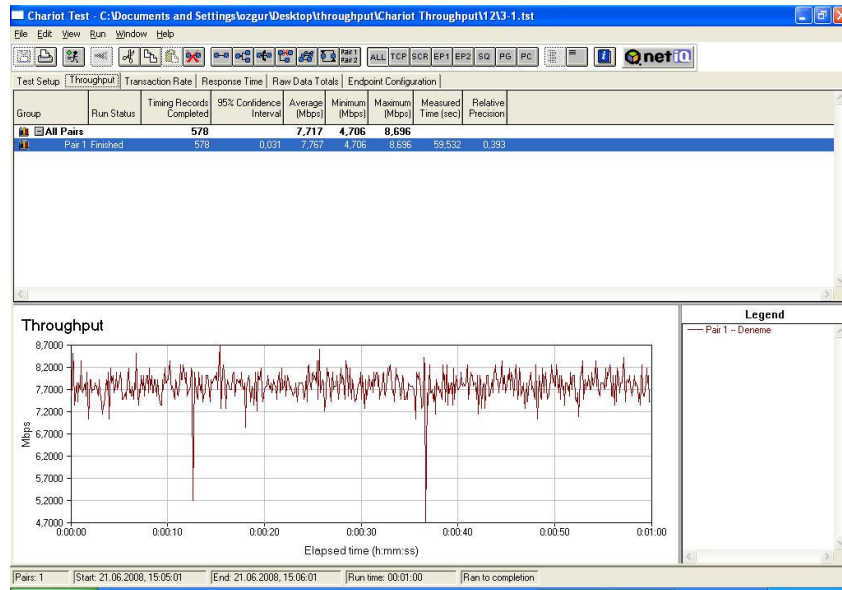
**d=130 metre**



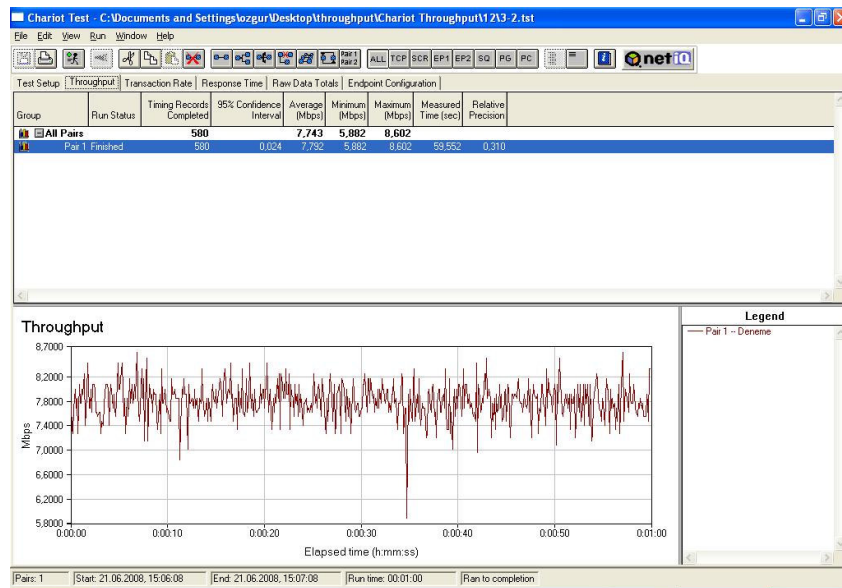
**d=140 metre**



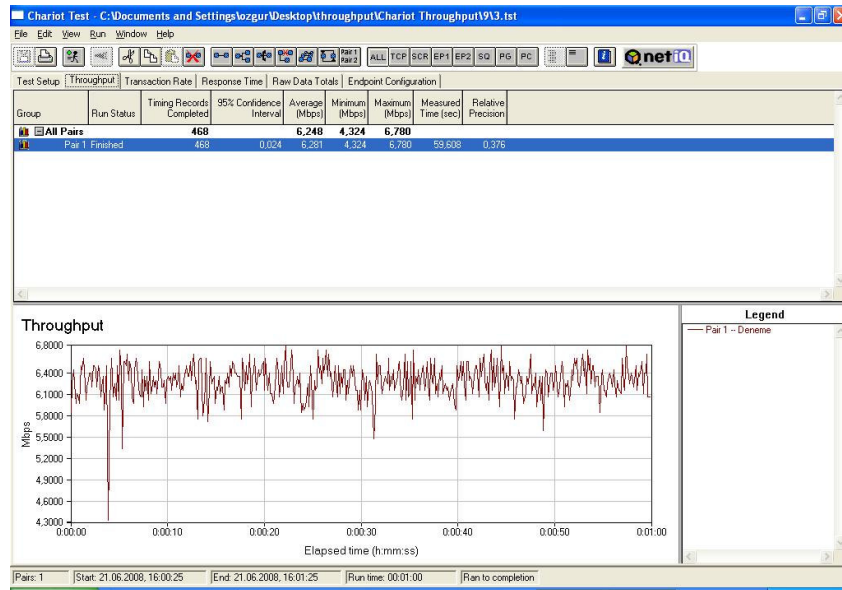
**d=150 metre**



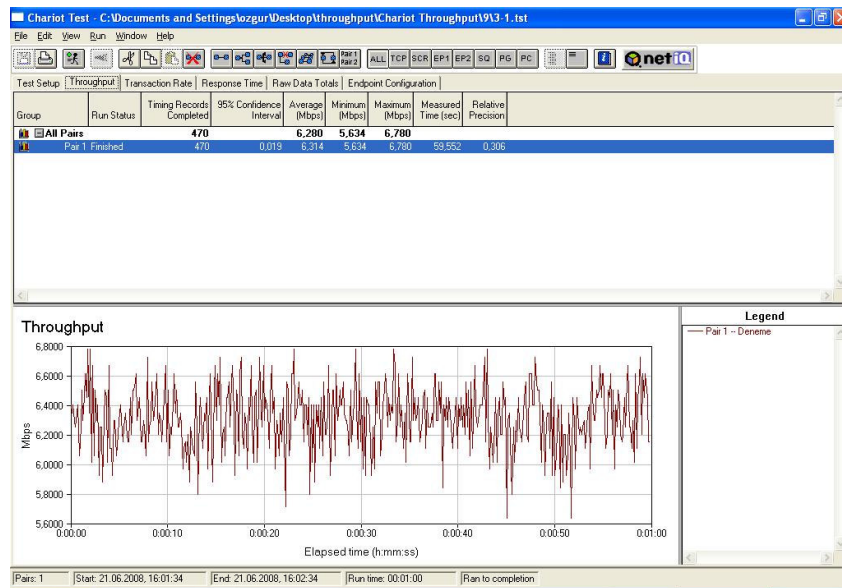
**d=160 metre**



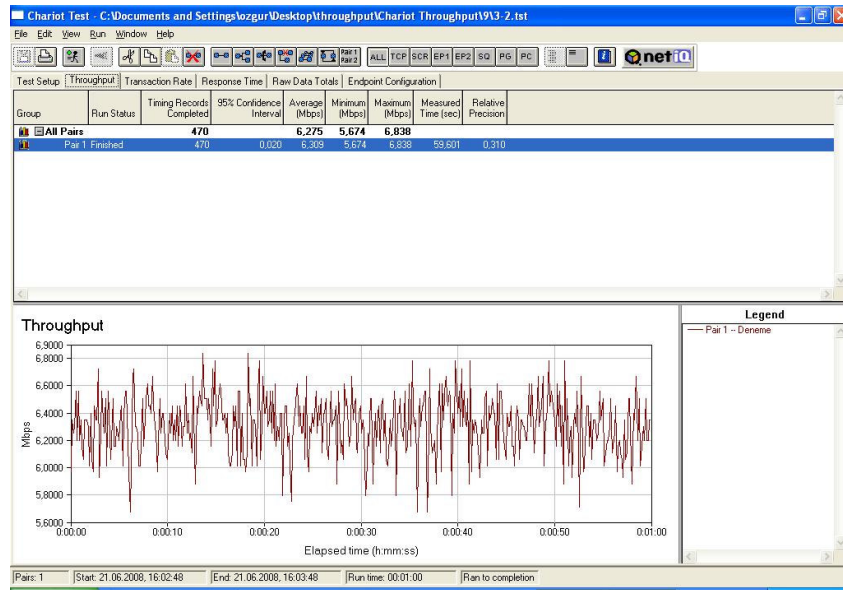
**d=170 metre**



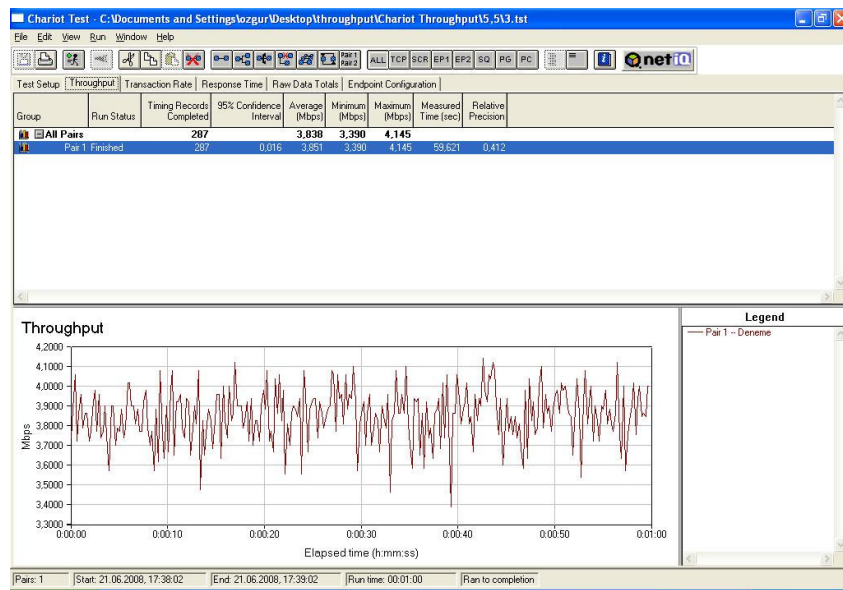
**d=180 metre**



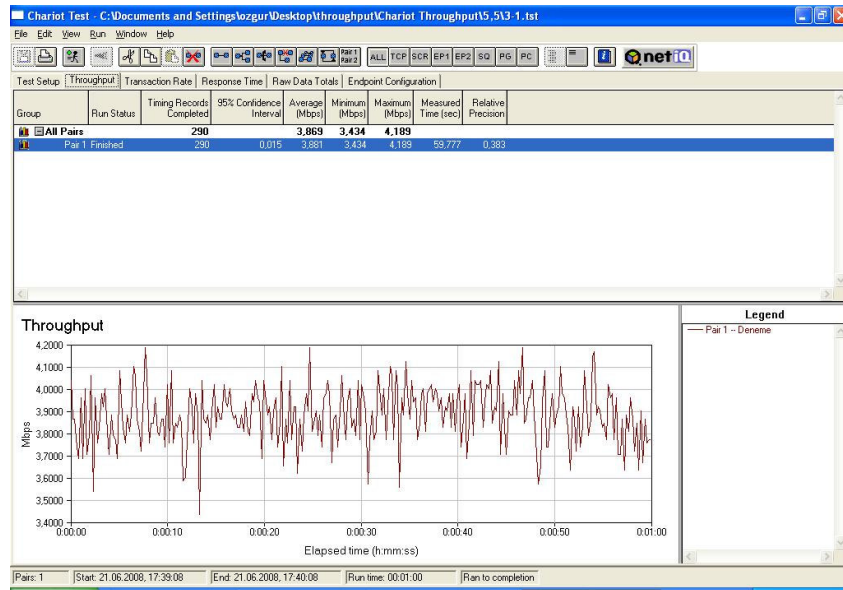
**d=190 metre**



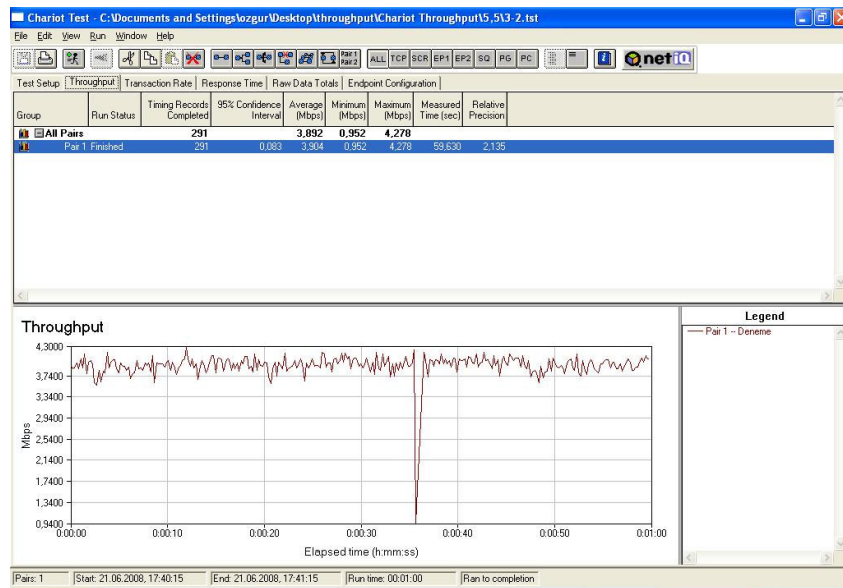
**d=200 metre**



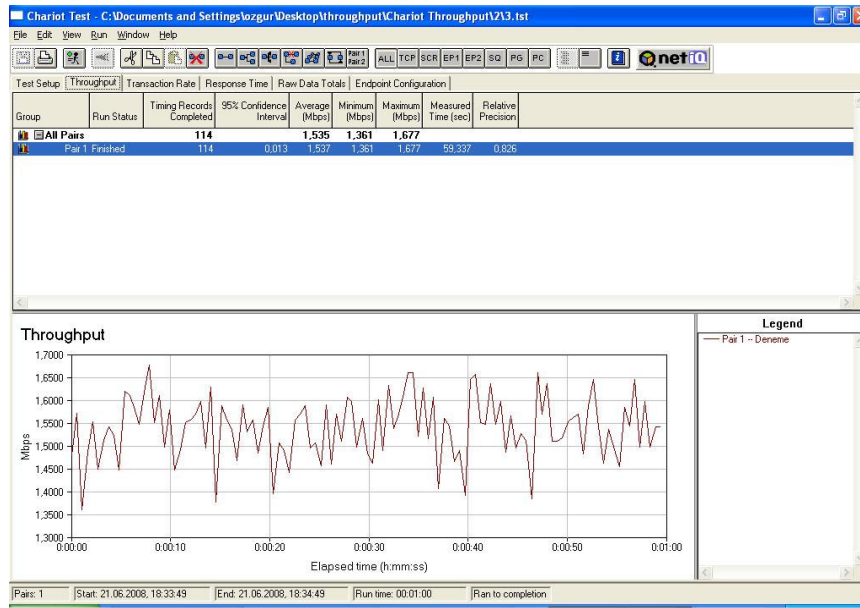
**d=210 metre**



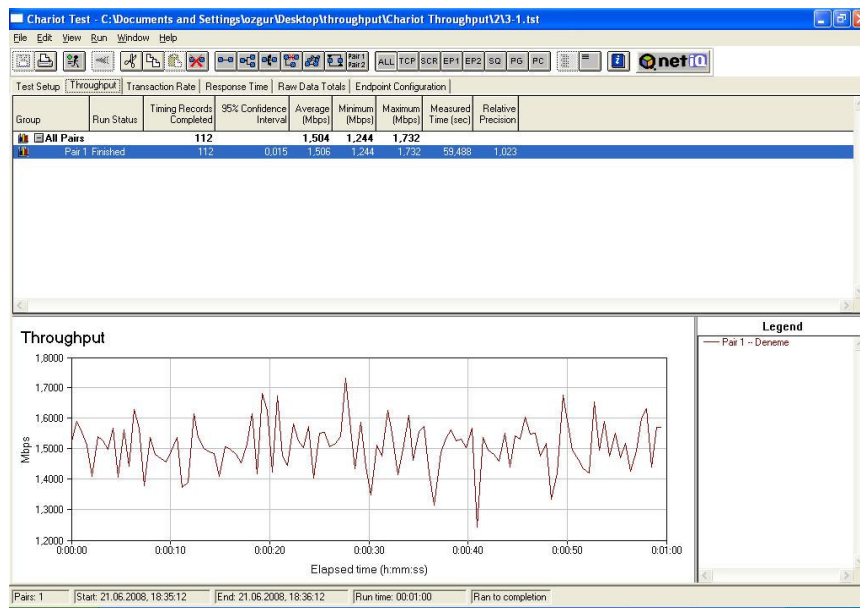
**d=220 metre**



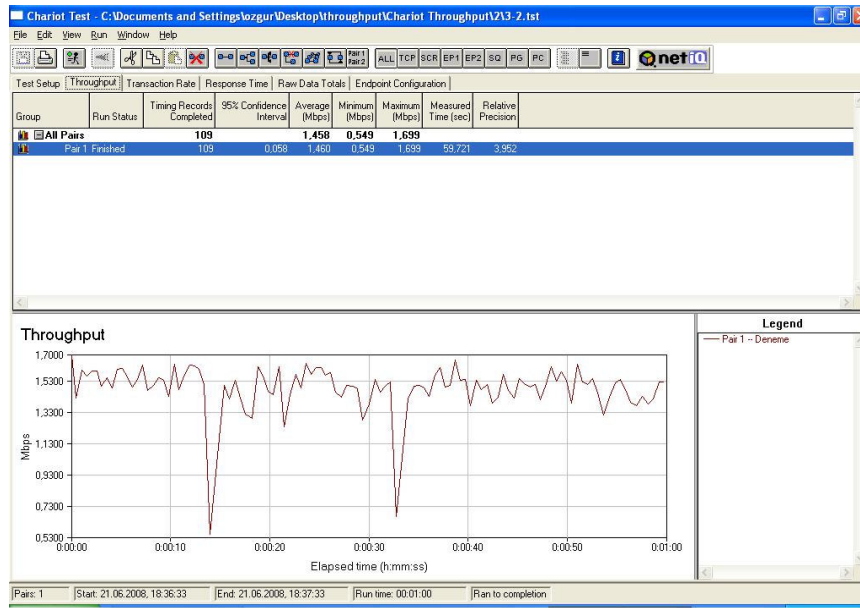
**d=230 metre**



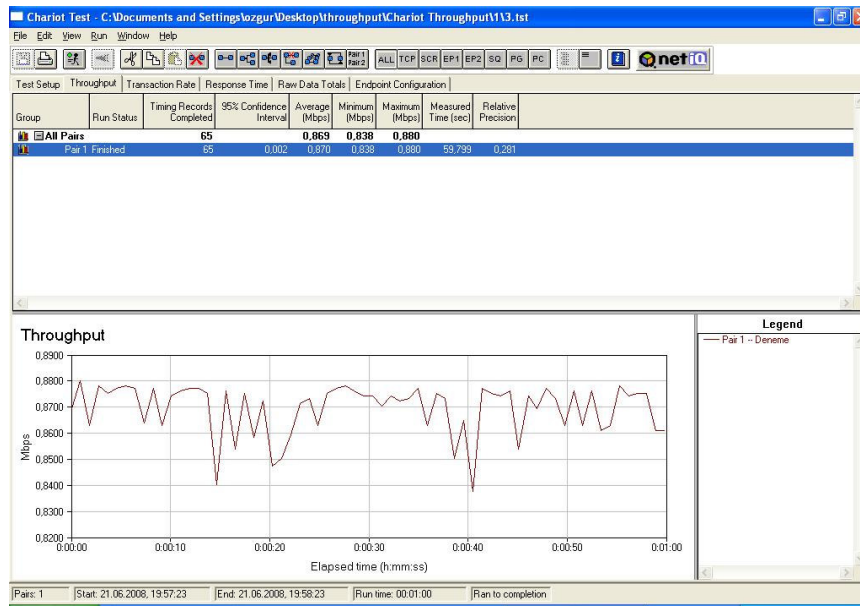
**d=240 metre**



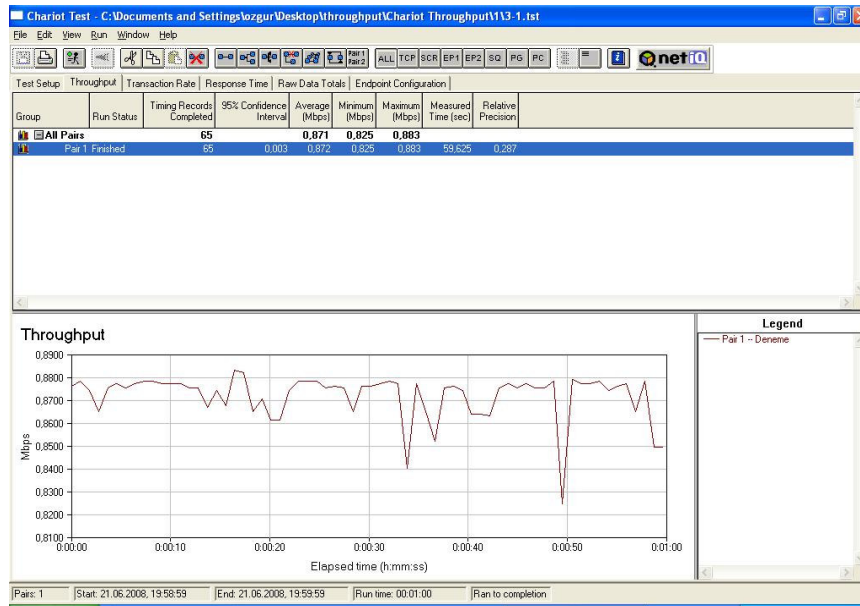
**d=250 metre**



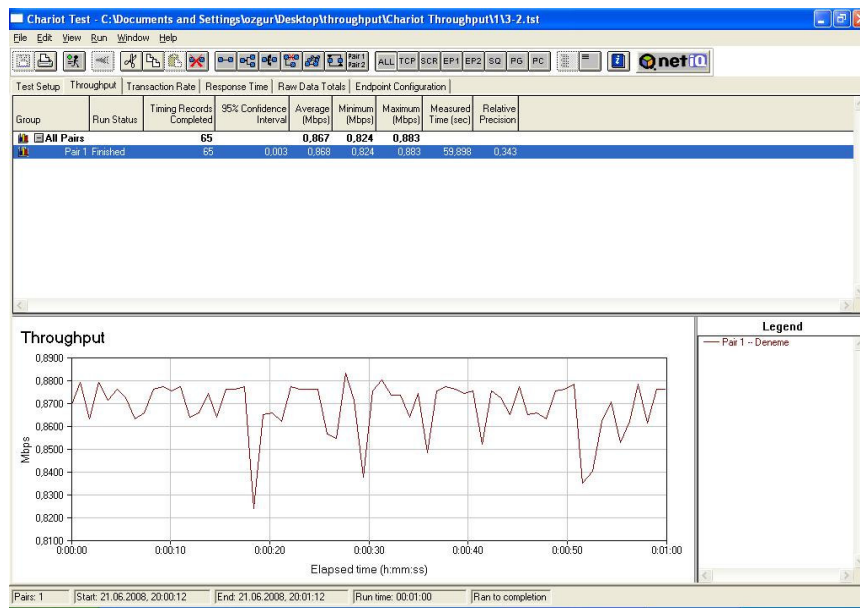
**d=260 metre**



**d=270 metre**



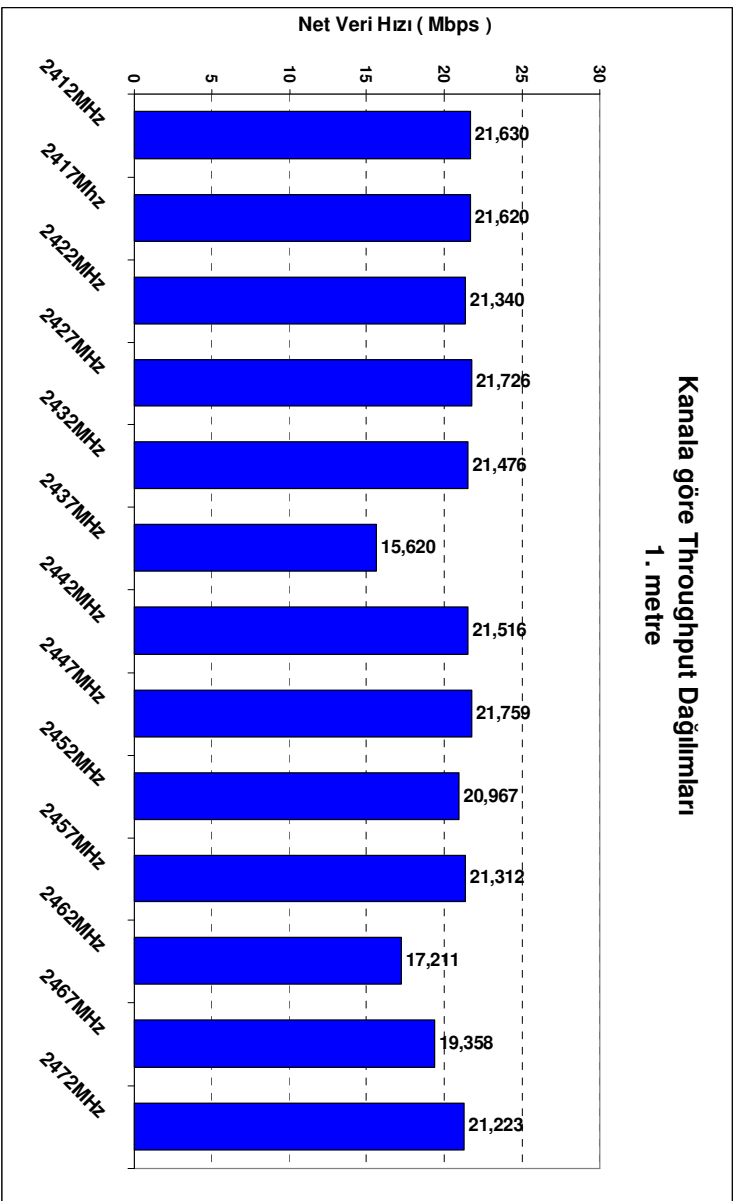
**d=280 metre**



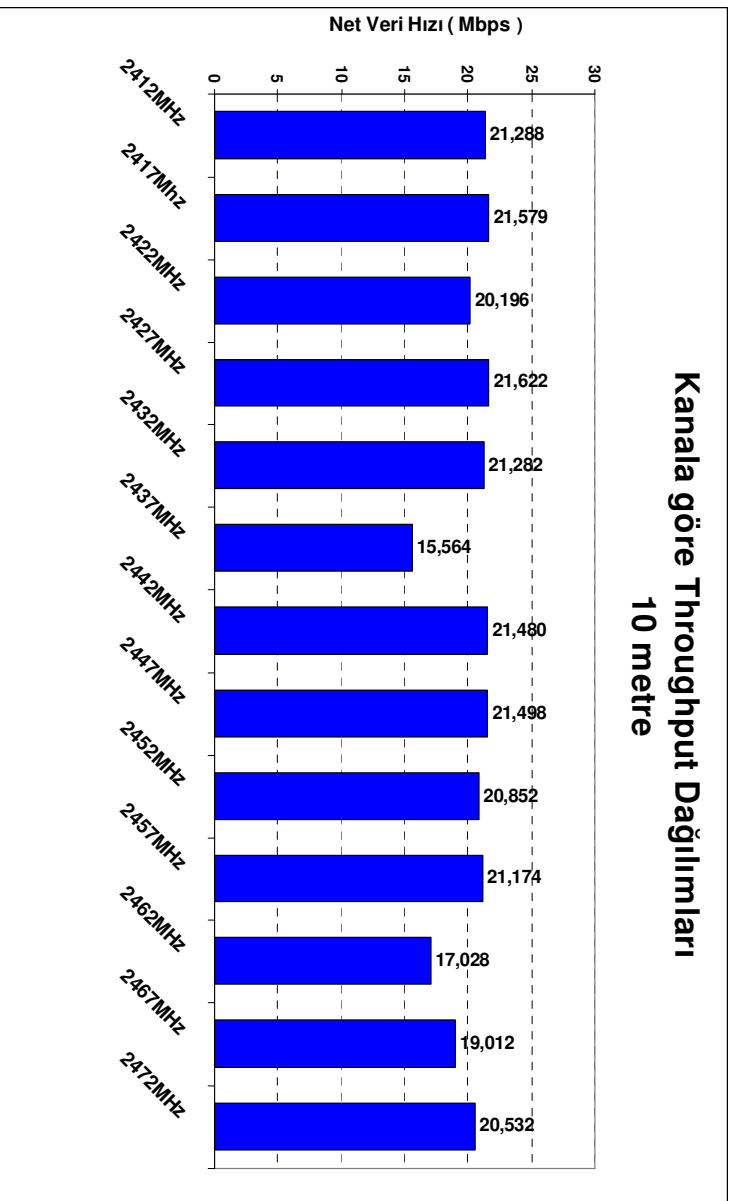
**d=290 metre**

### Ek 3: Net Veri Hızı Ölçüm Sonuçları

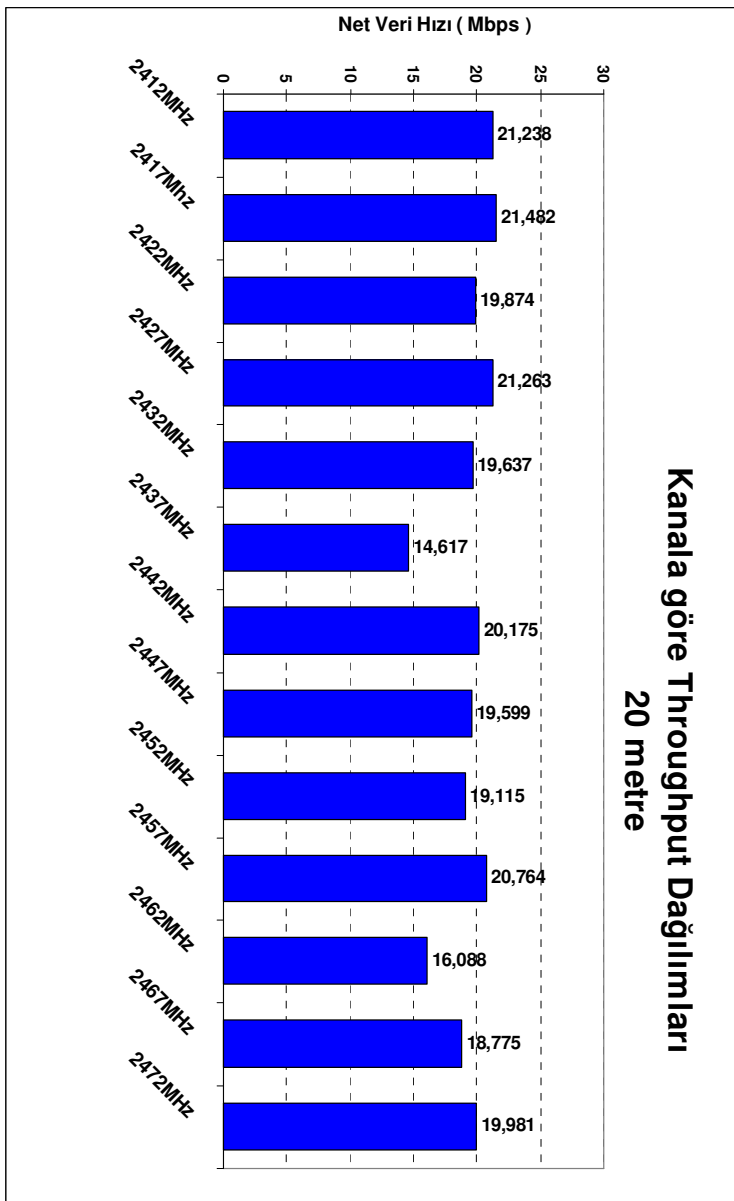
d=1 metre için:



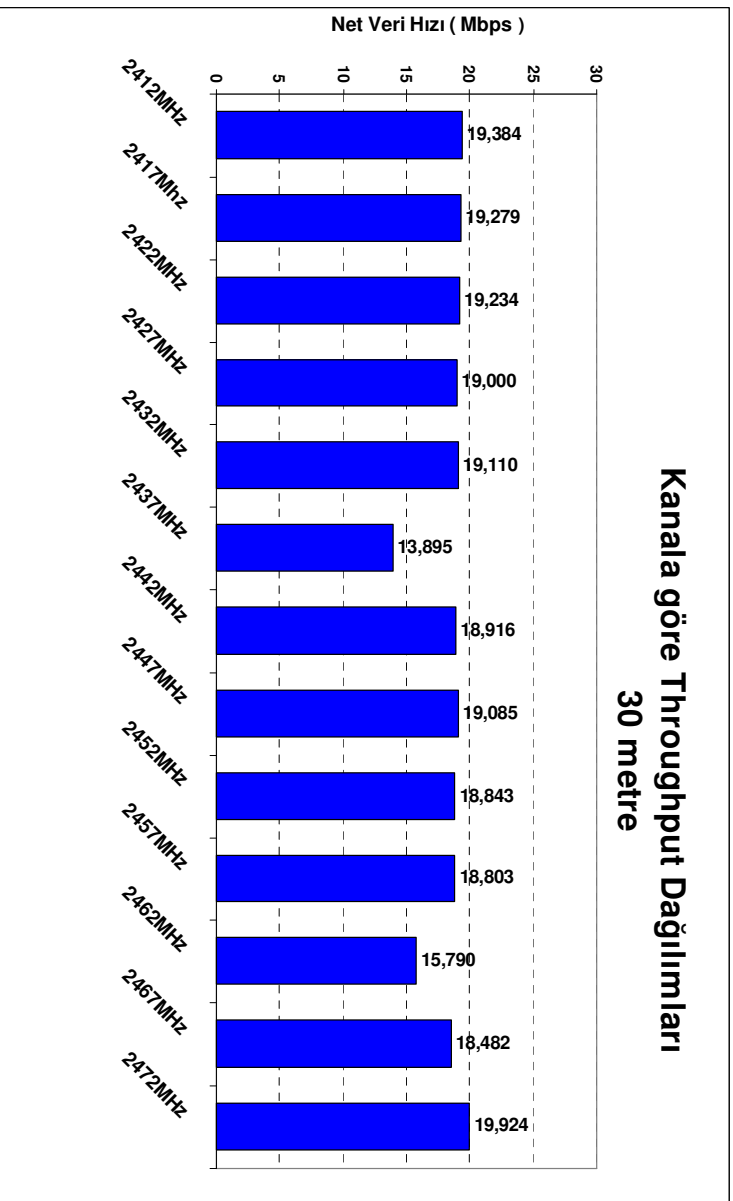
d=10 metre için:



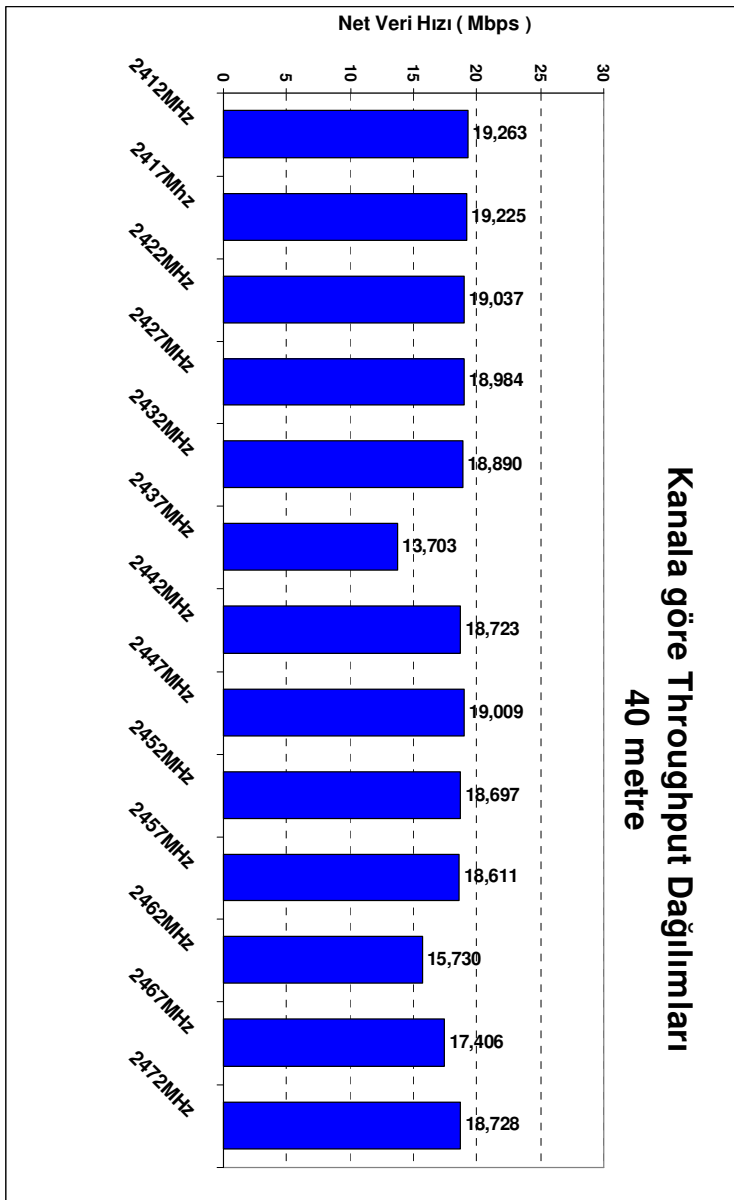
d=20 metre için:



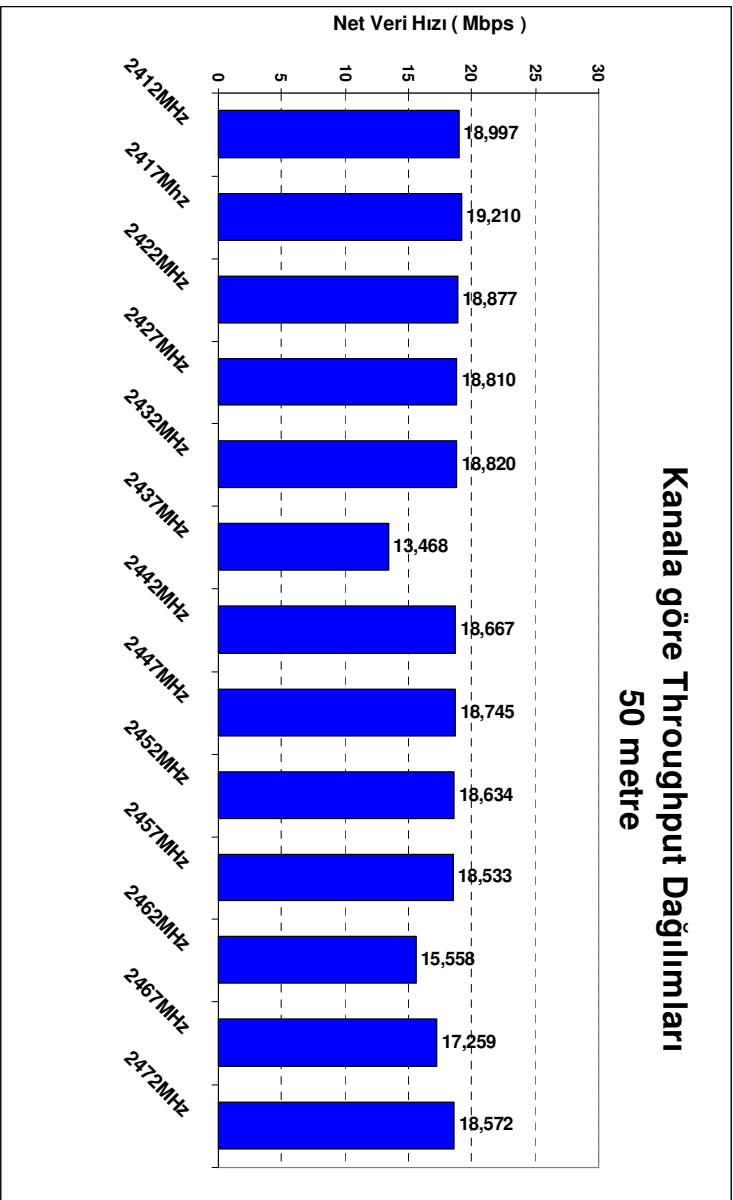
d=30 metre için:



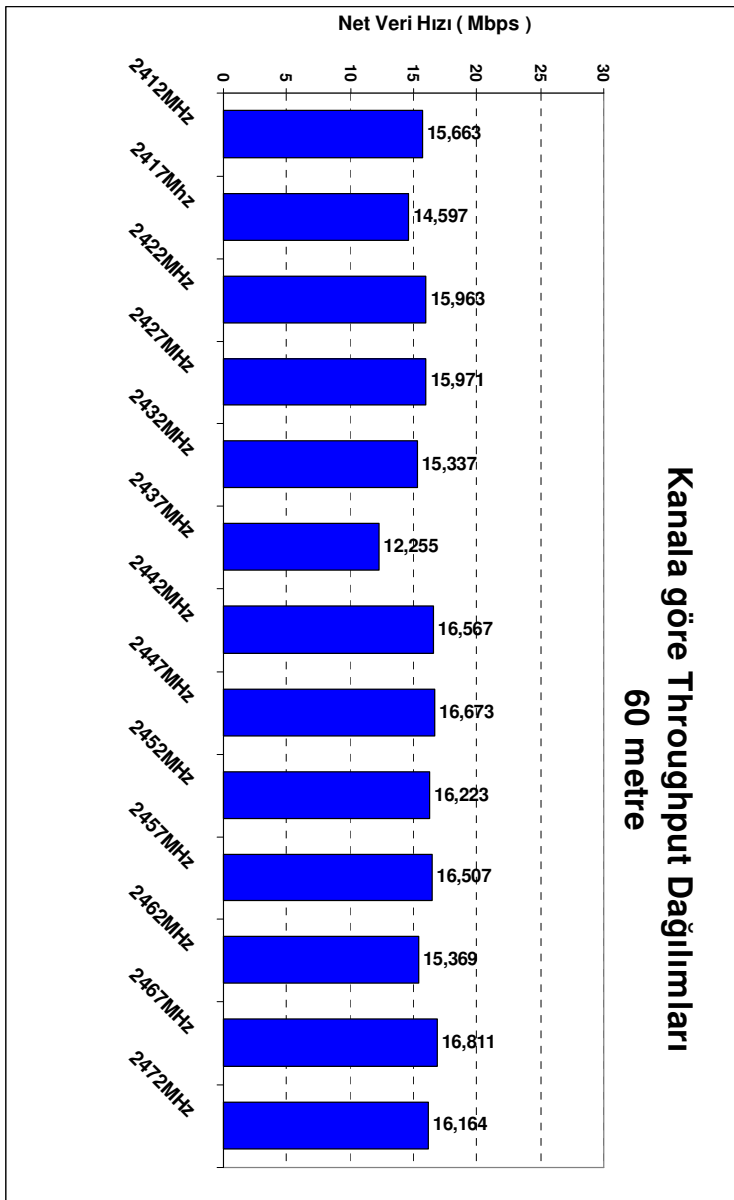
d=40 metre için:



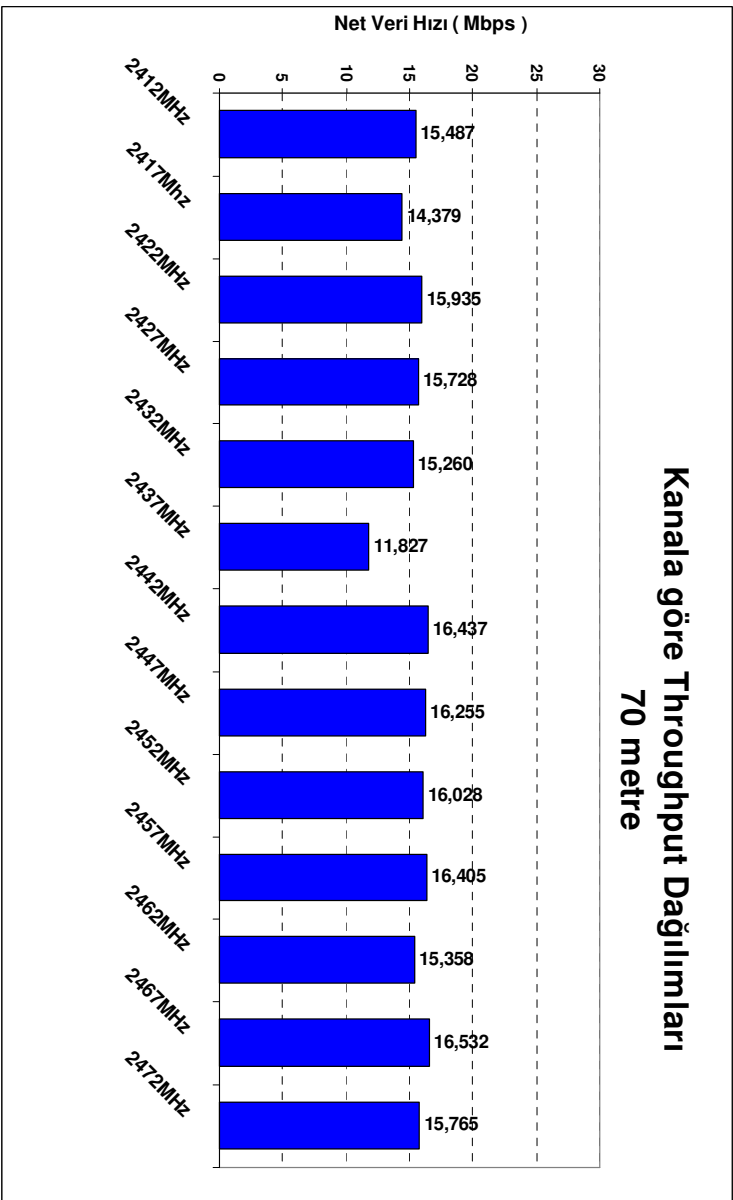
d=50 metre için:



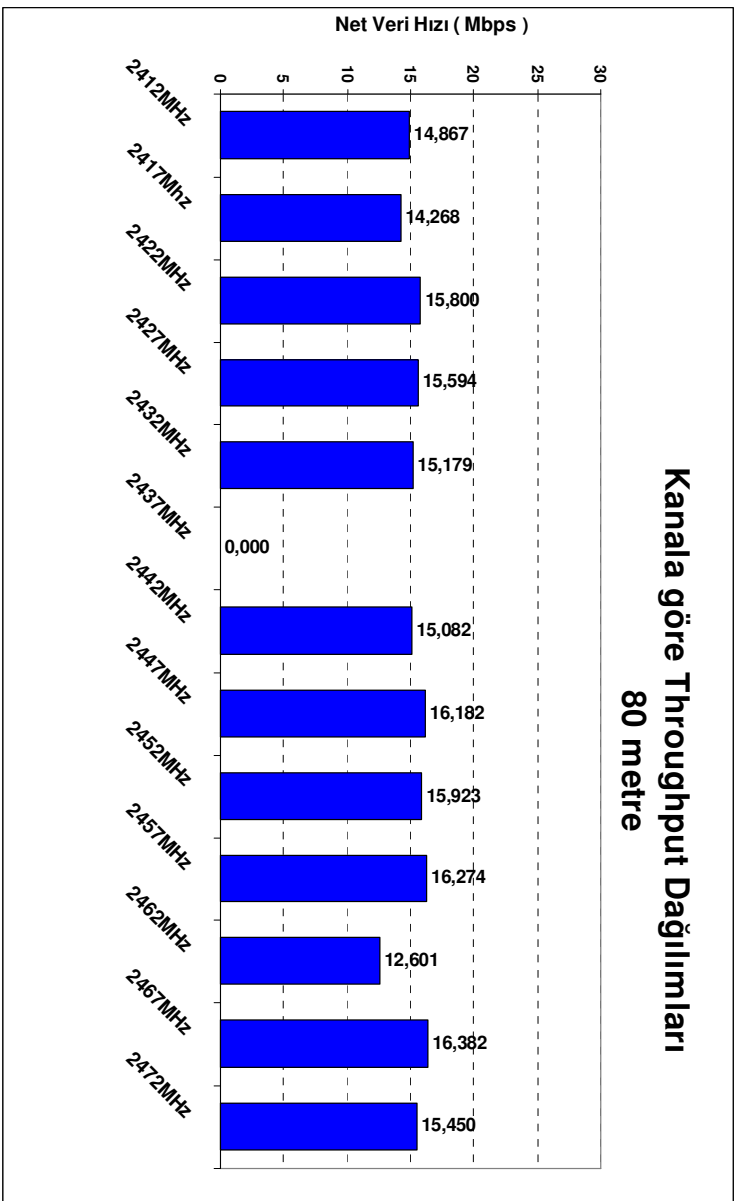
d=60 metre için:



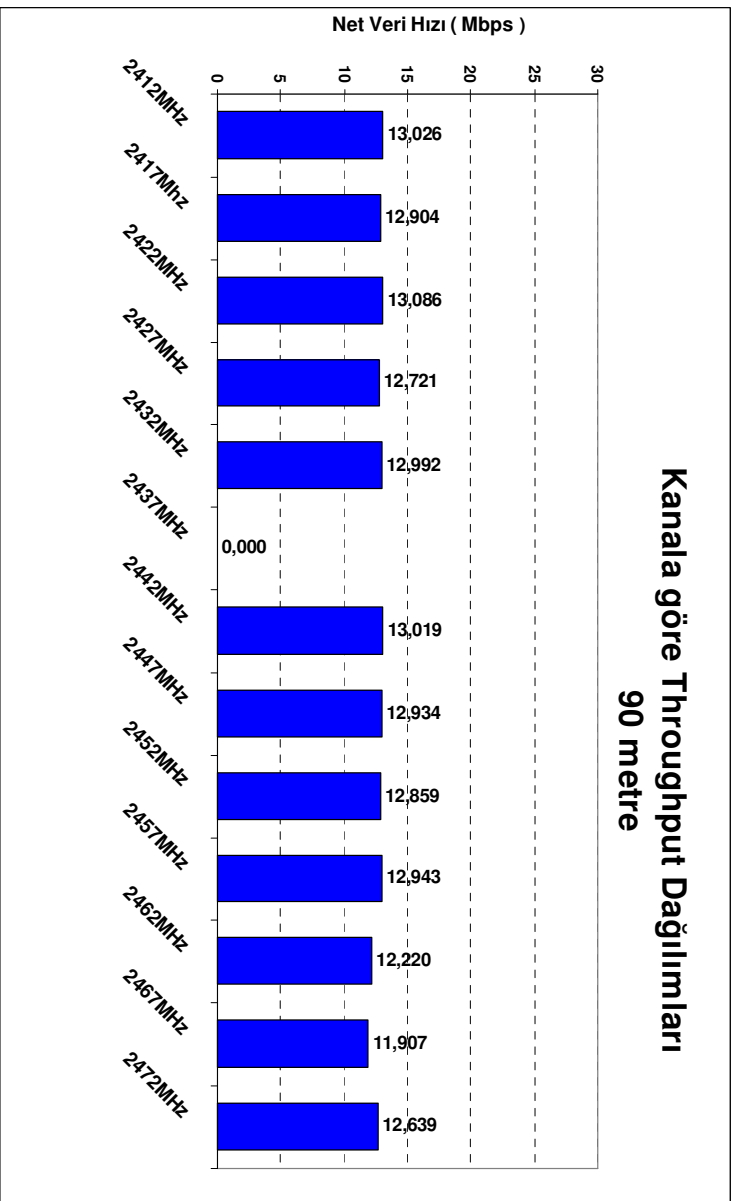
d=70 metre için:



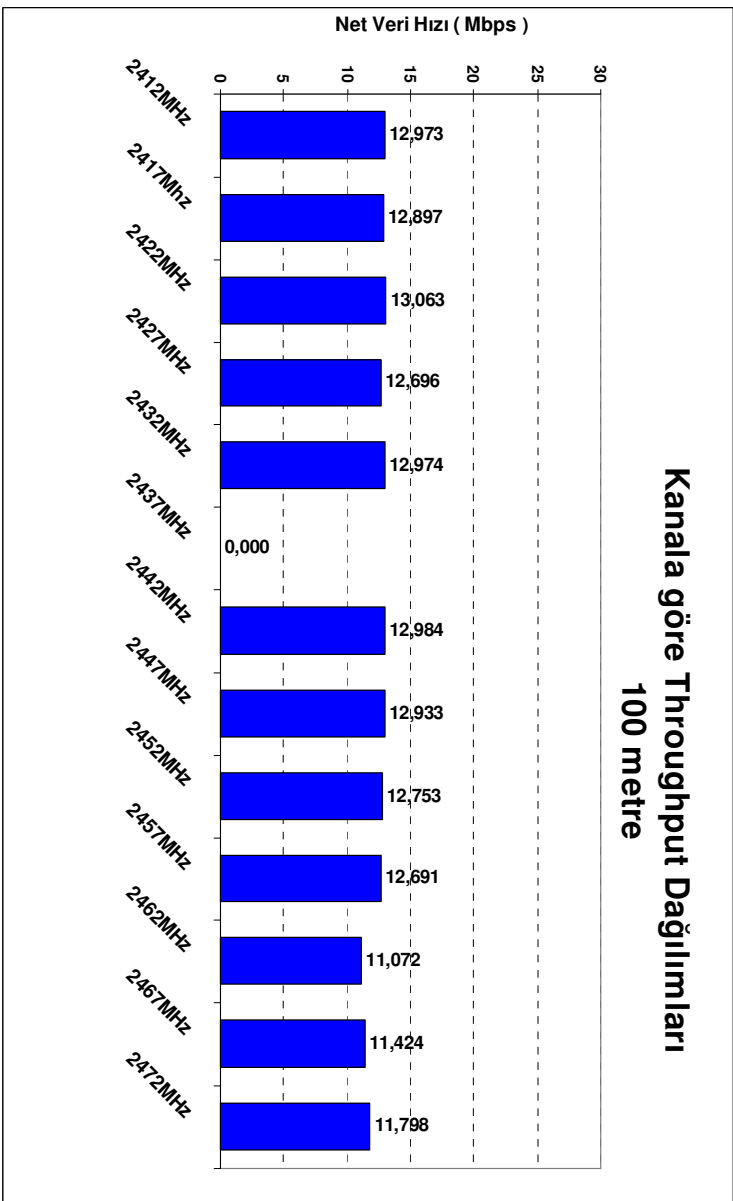
d=80 metre için:



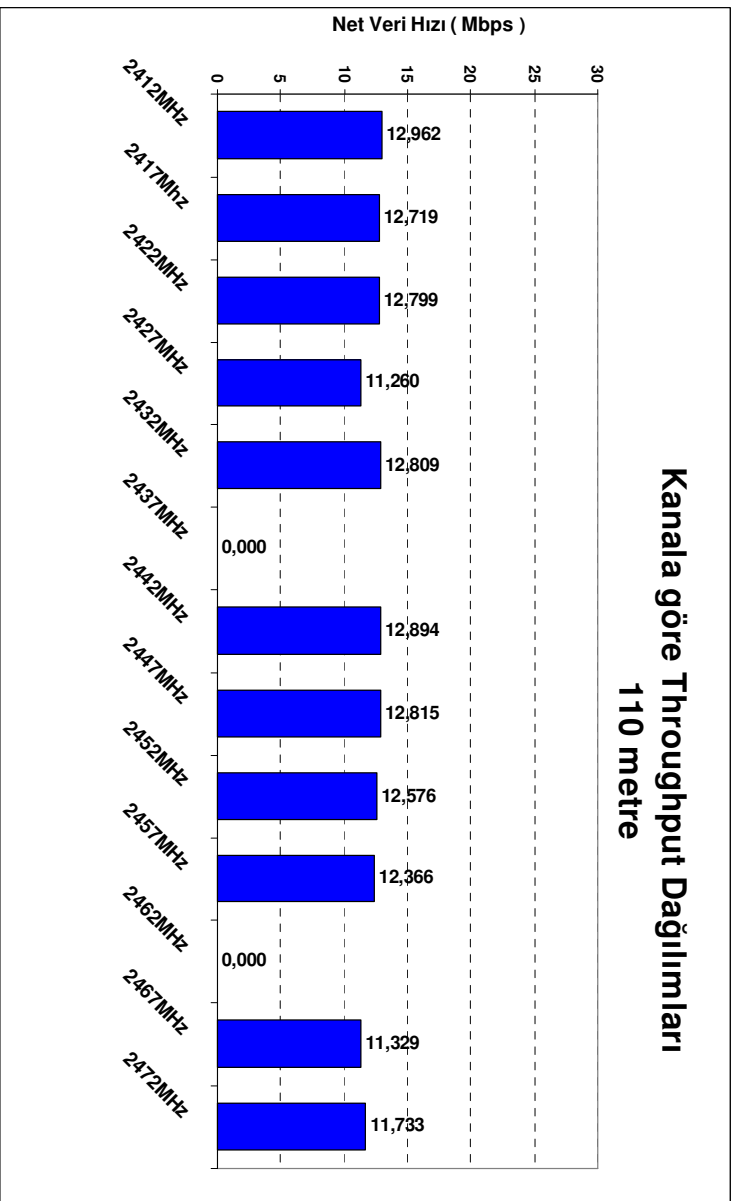
d=90 metre için:



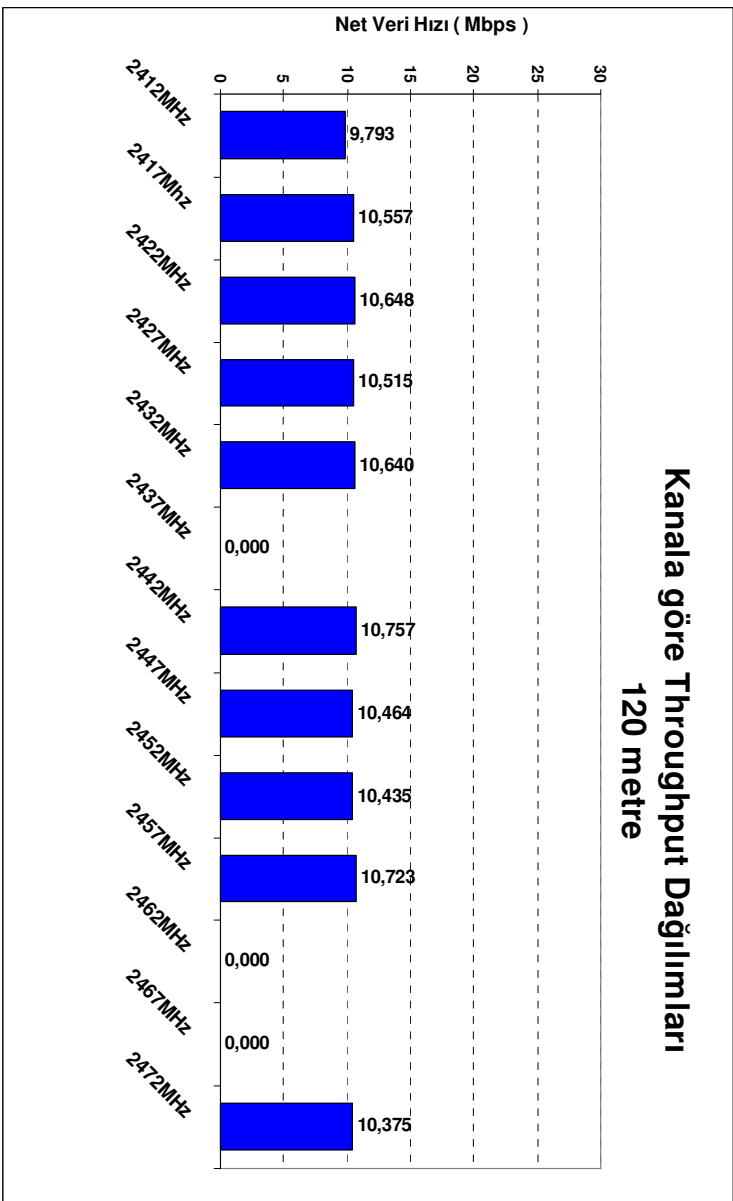
**d=100 metre için:**



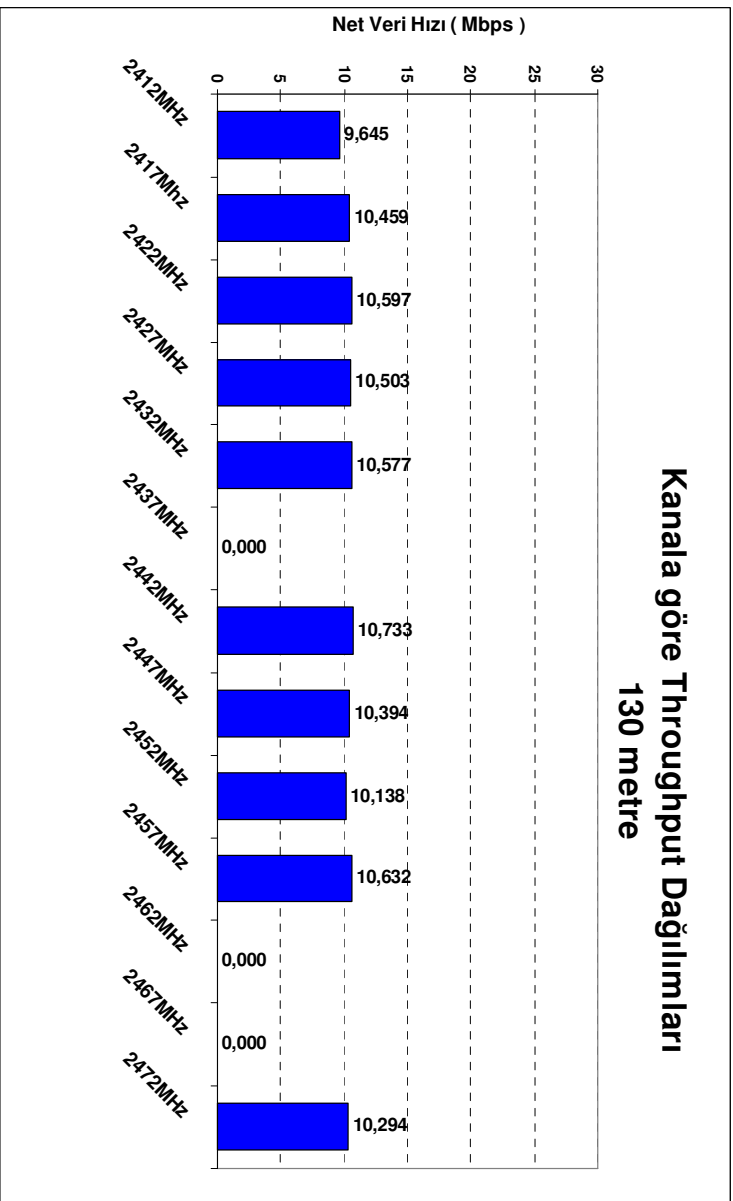
**d=110 metre için:**



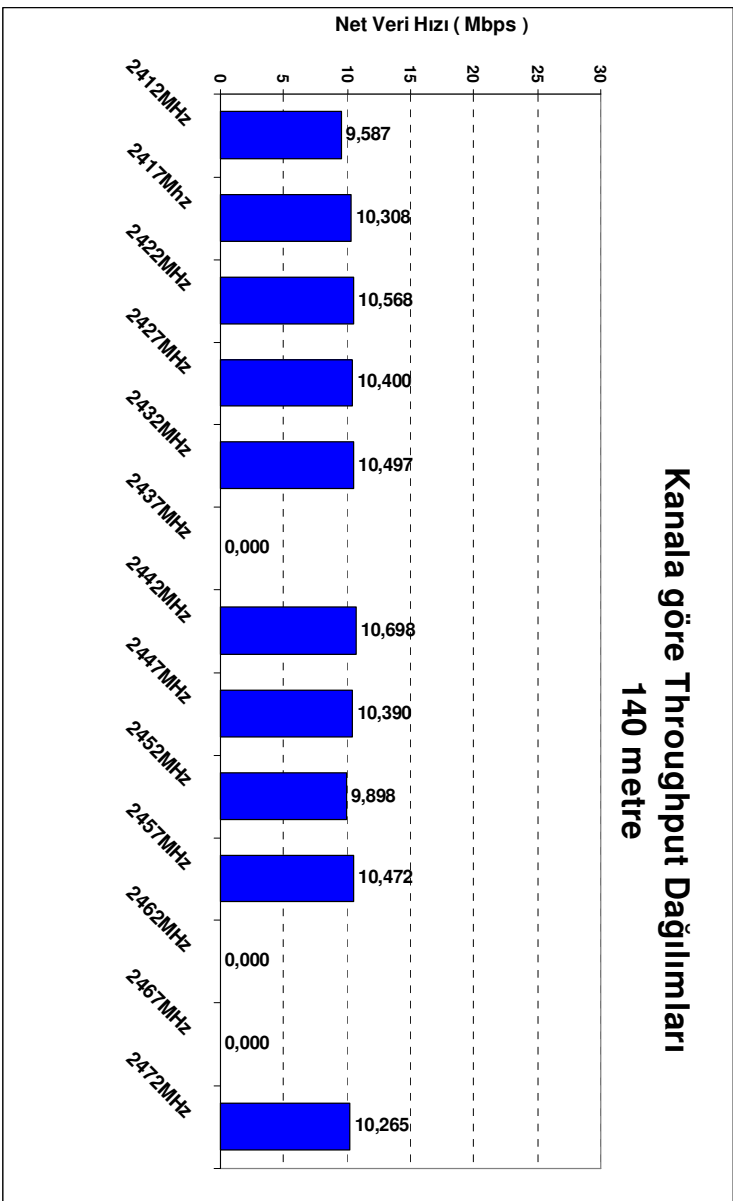
d=120 metre için:



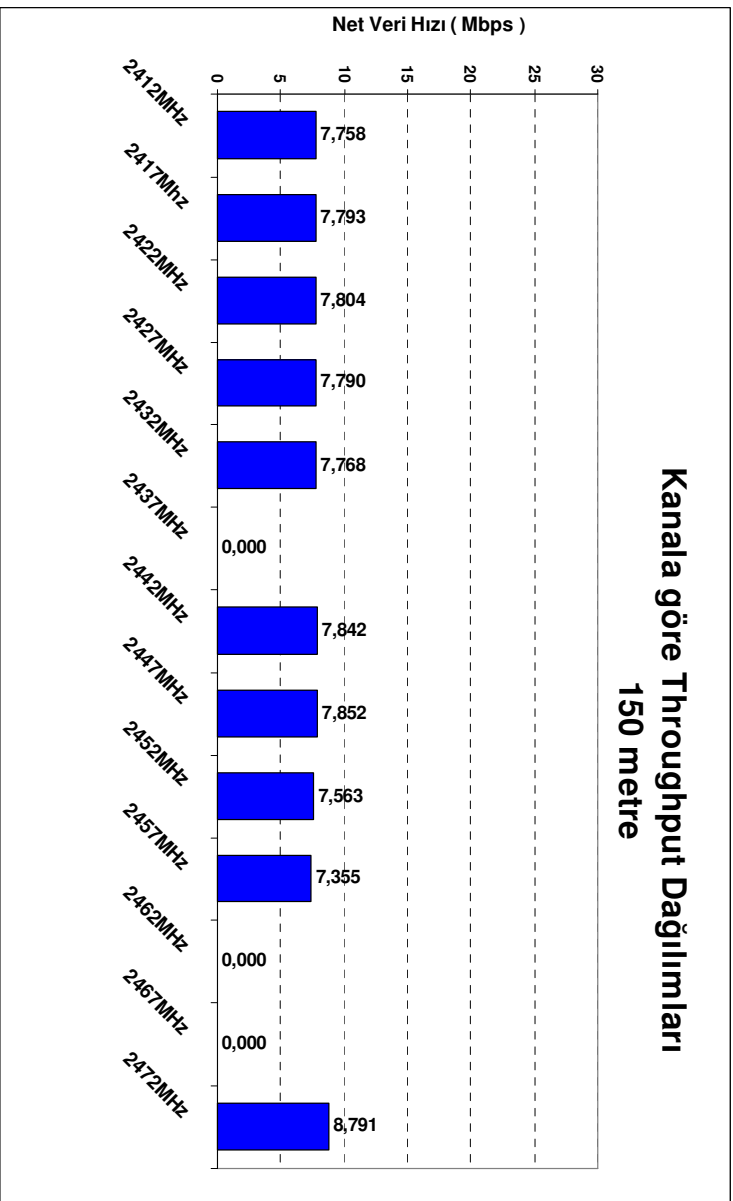
d=130 metre için:



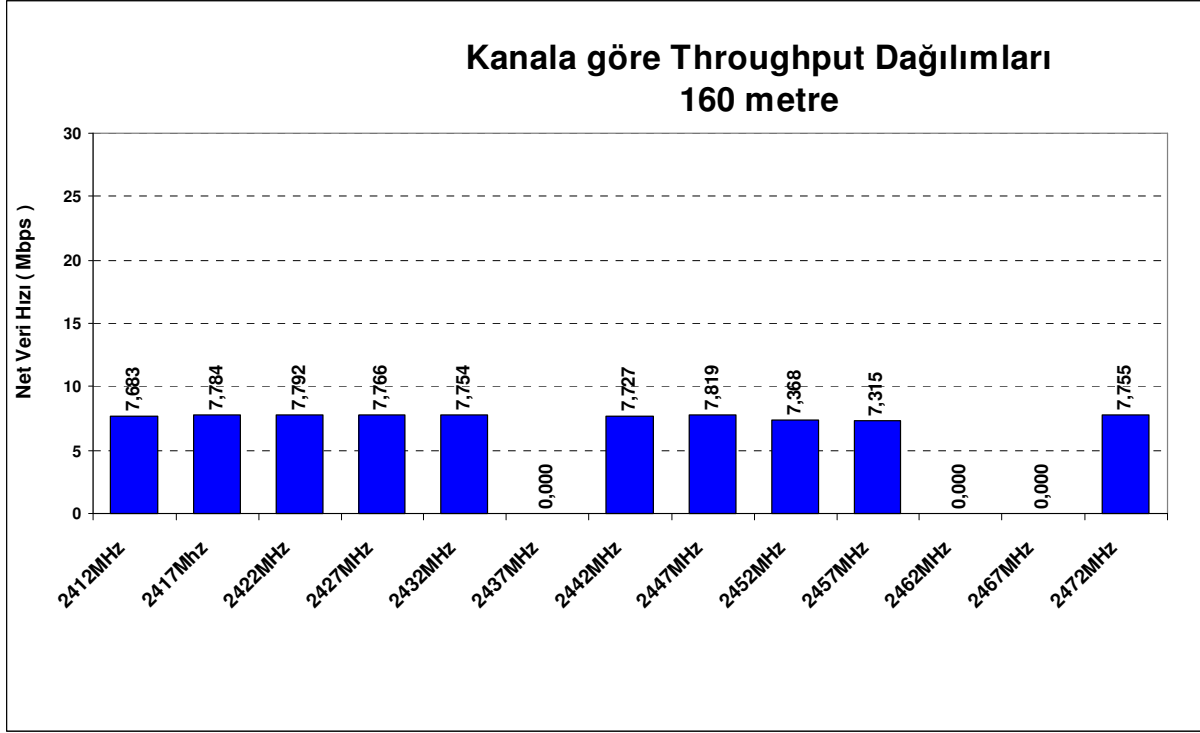
d=140 metre için:



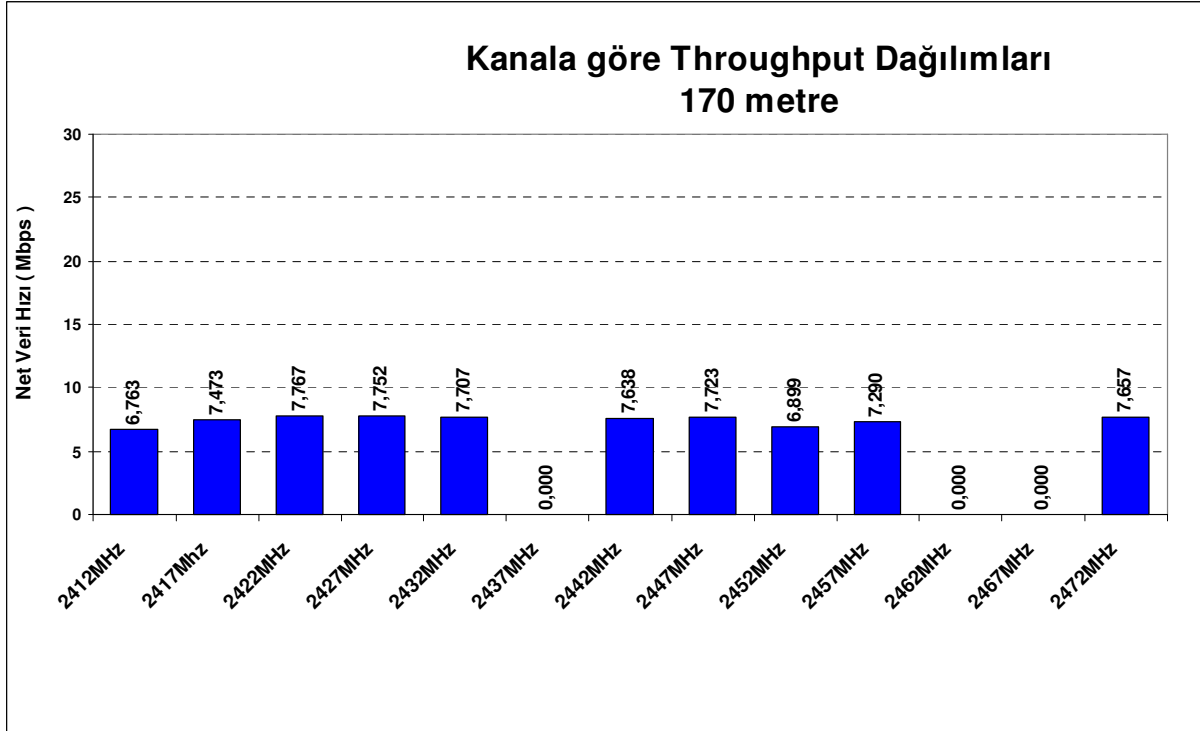
d=150 metre için:



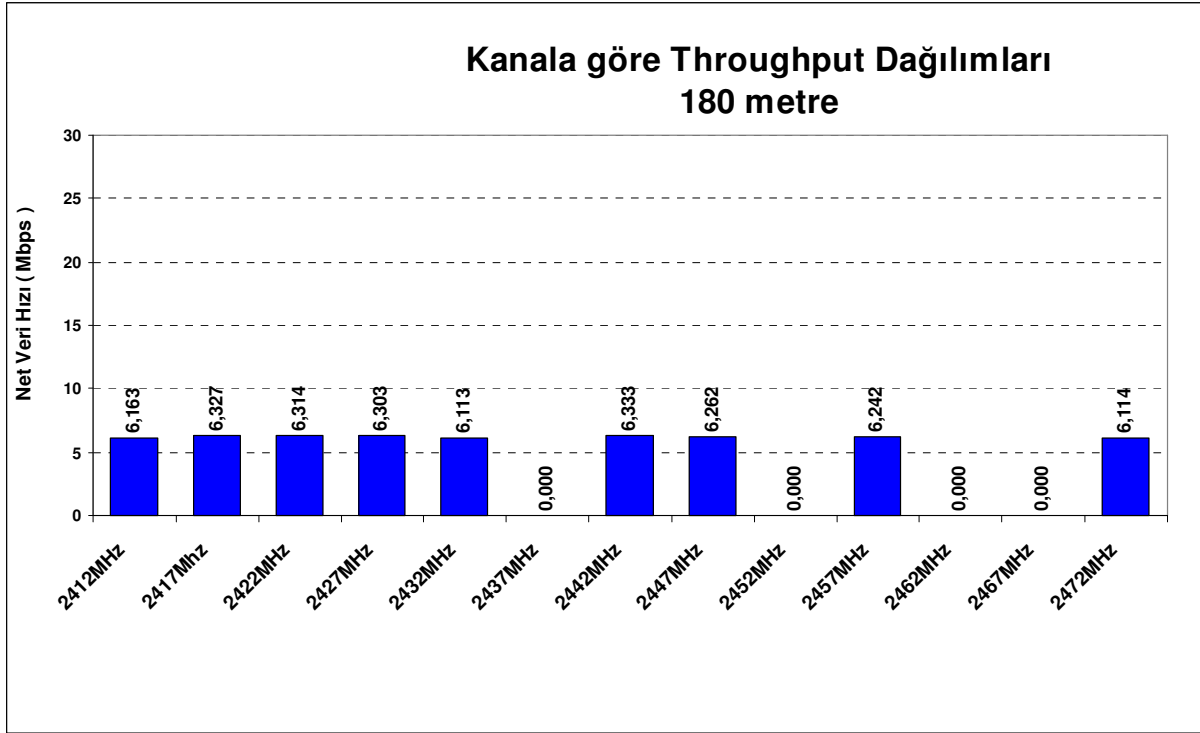
d=160 metre için:



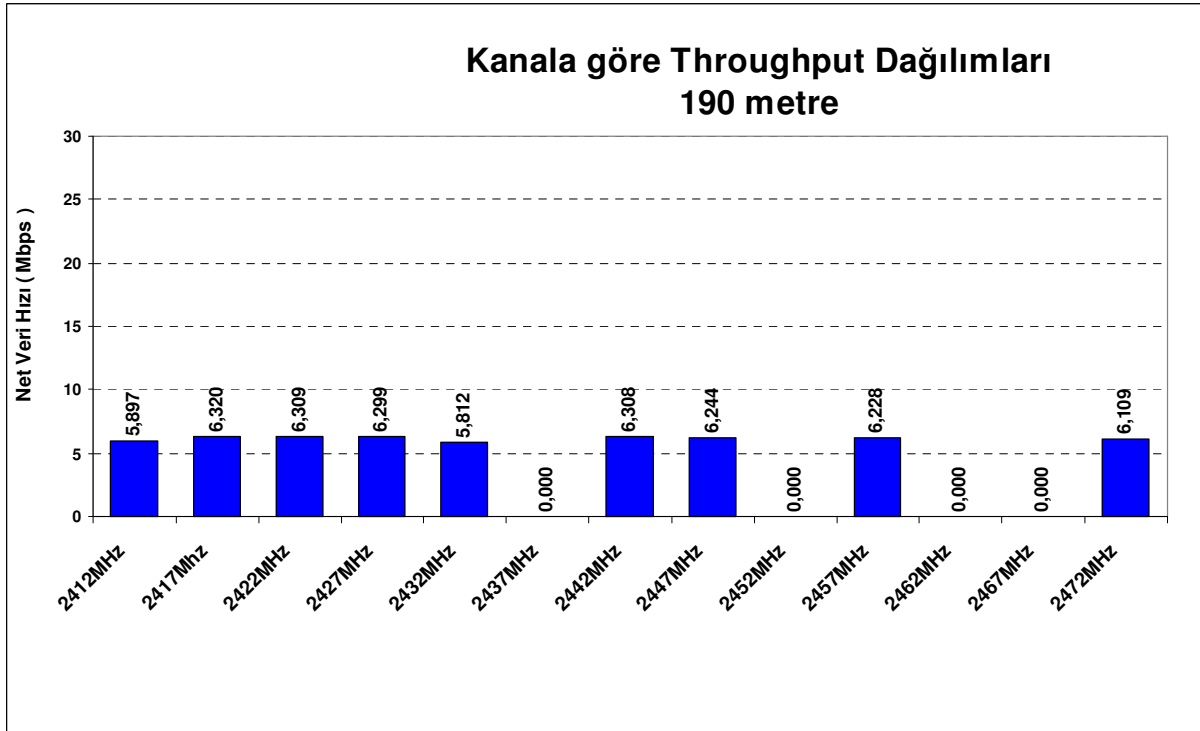
d=170 metre için:



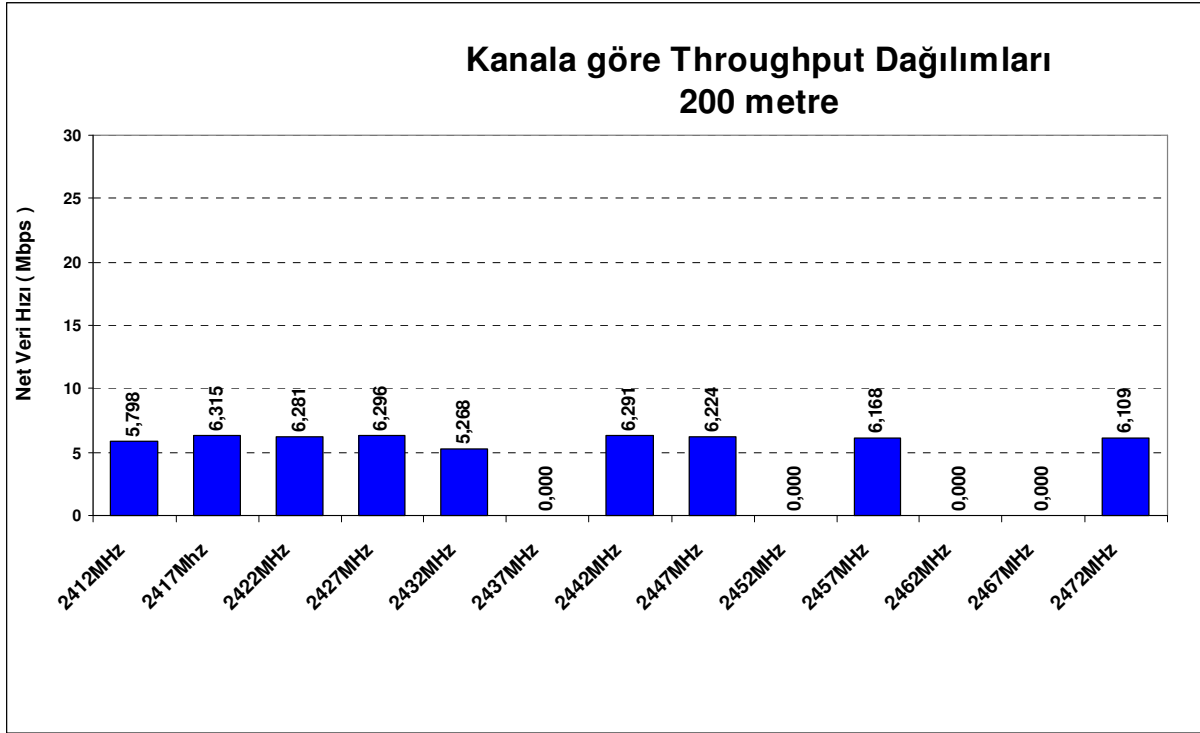
**d=180 metre için:**



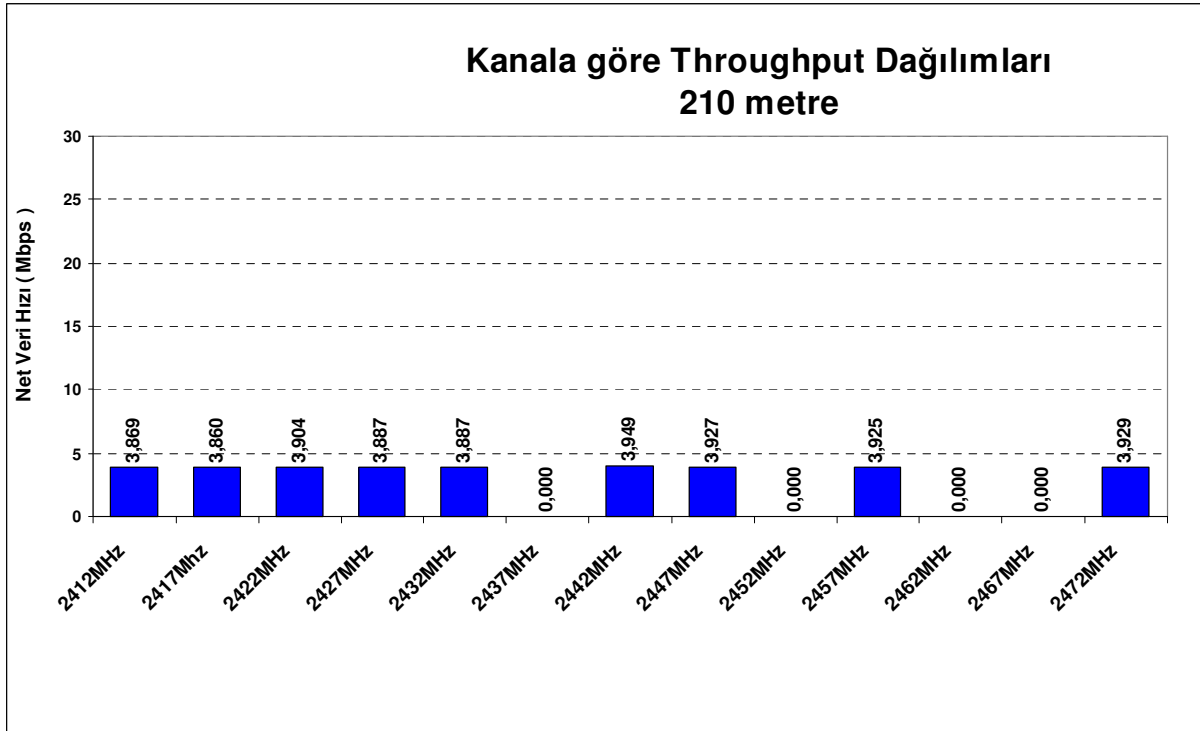
**d=190 metre için:**



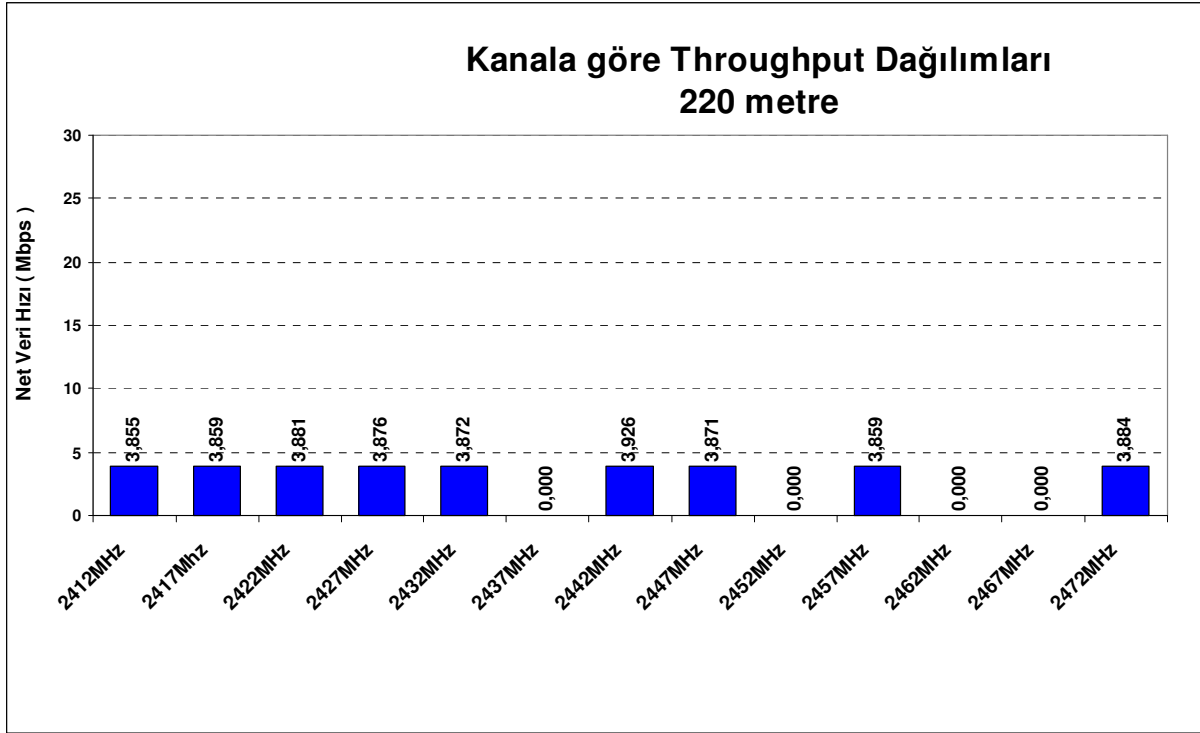
d=200 metre için:



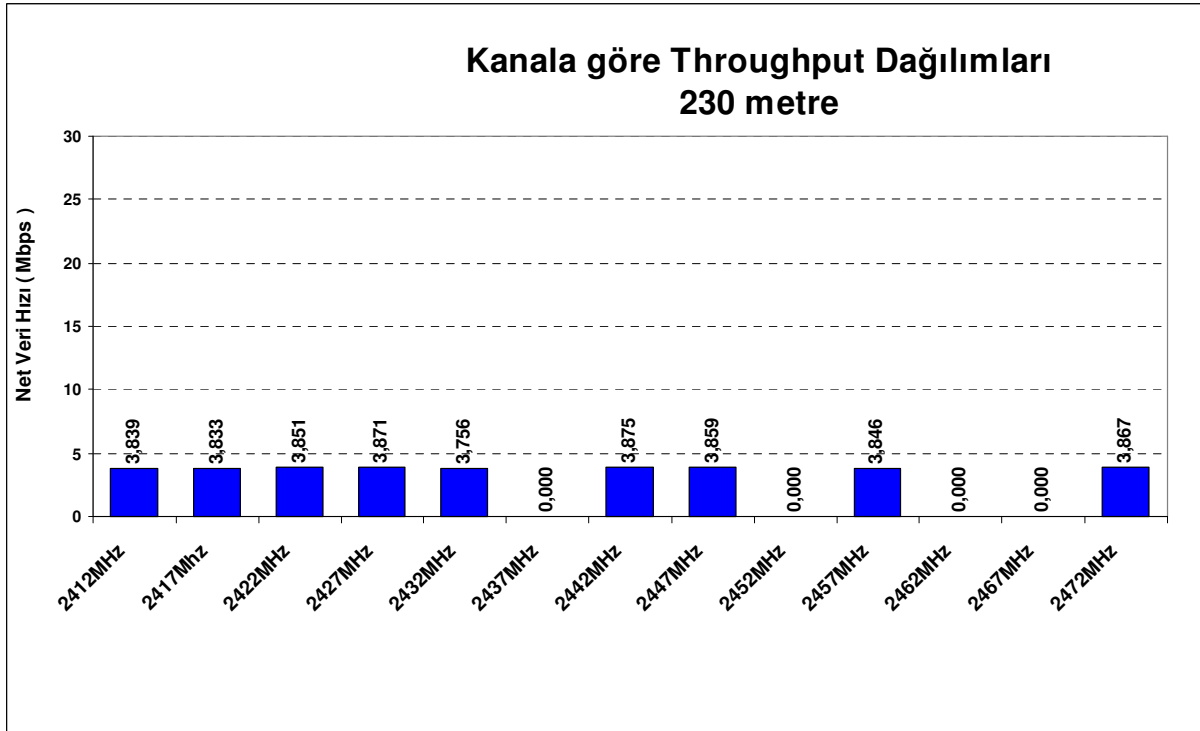
d=210 metre için:



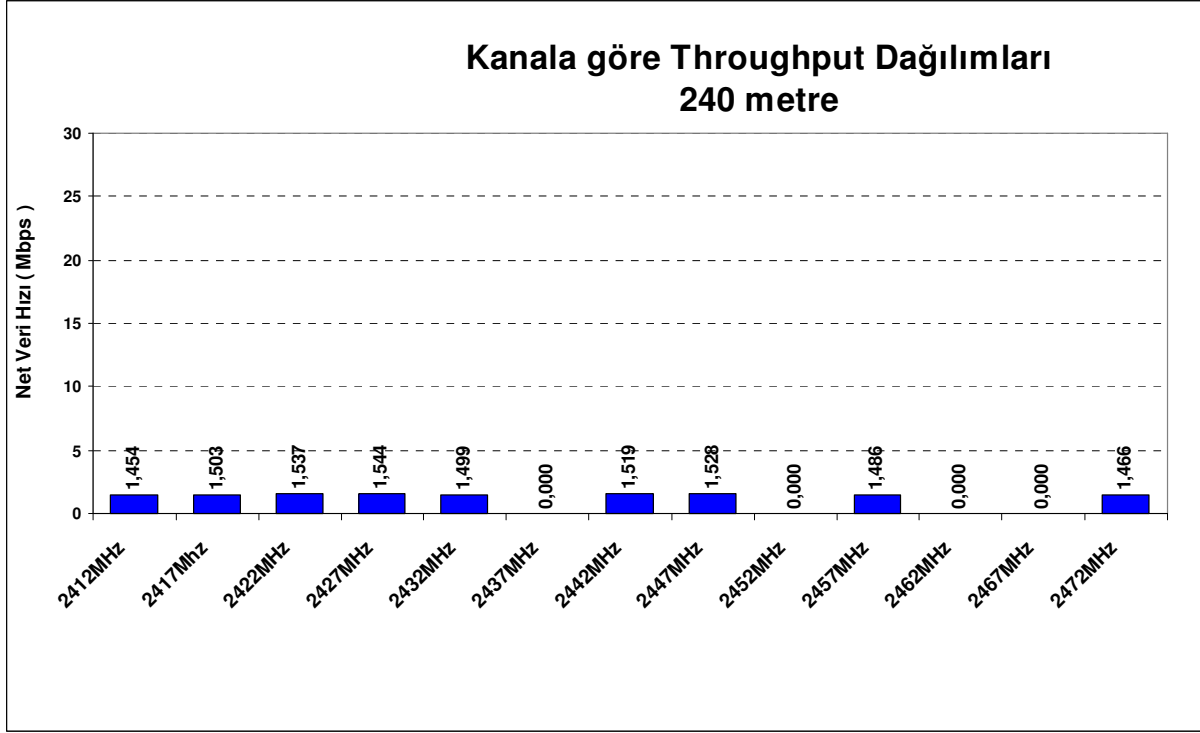
d=220 metre için:



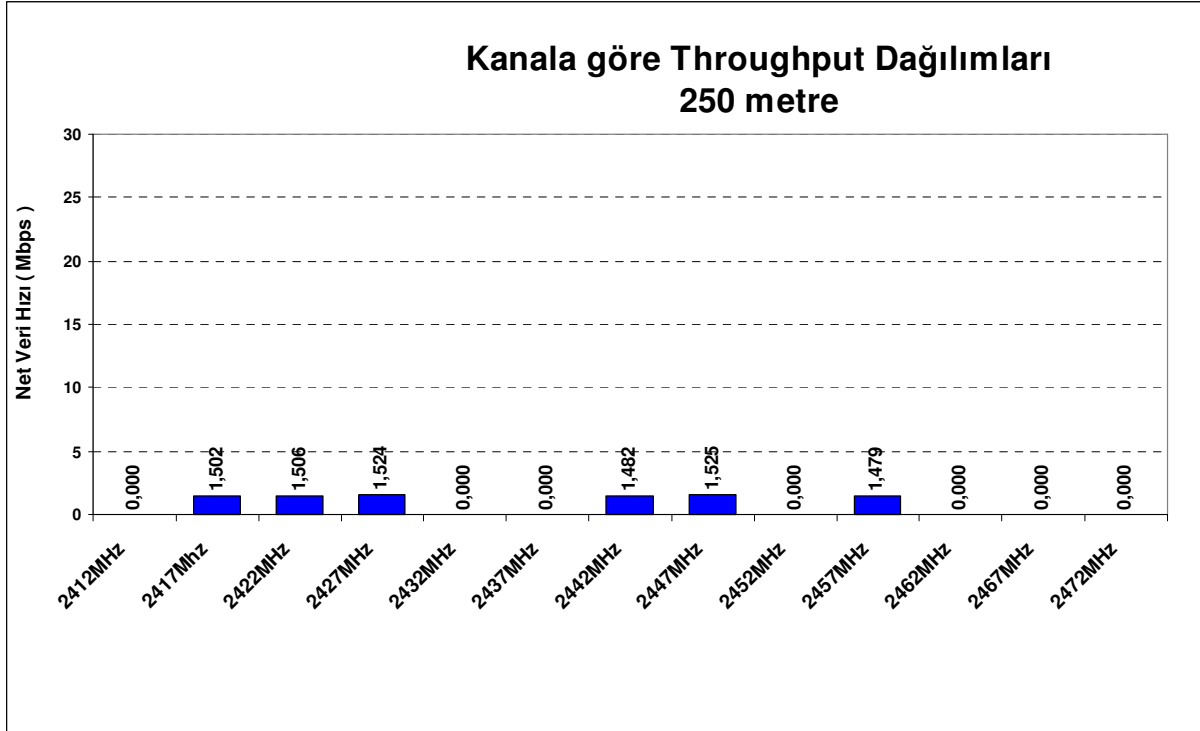
d=230 metre için:



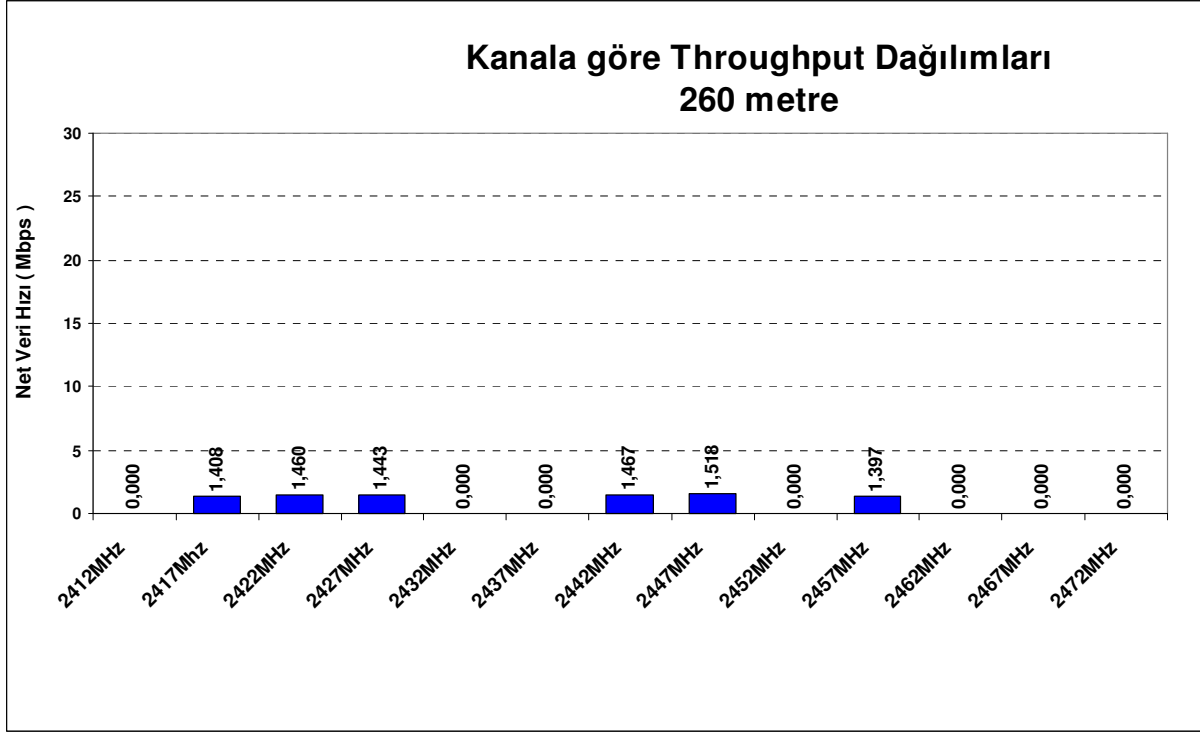
d=240 metre için:



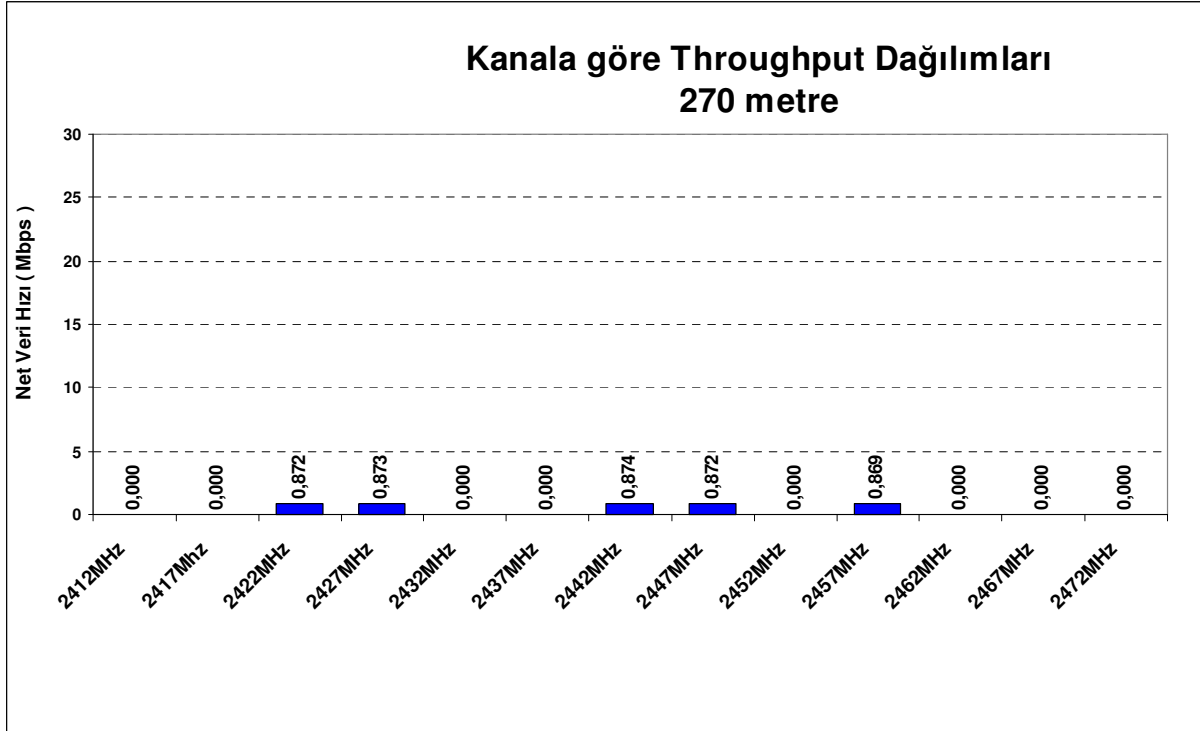
d=250 metre için:



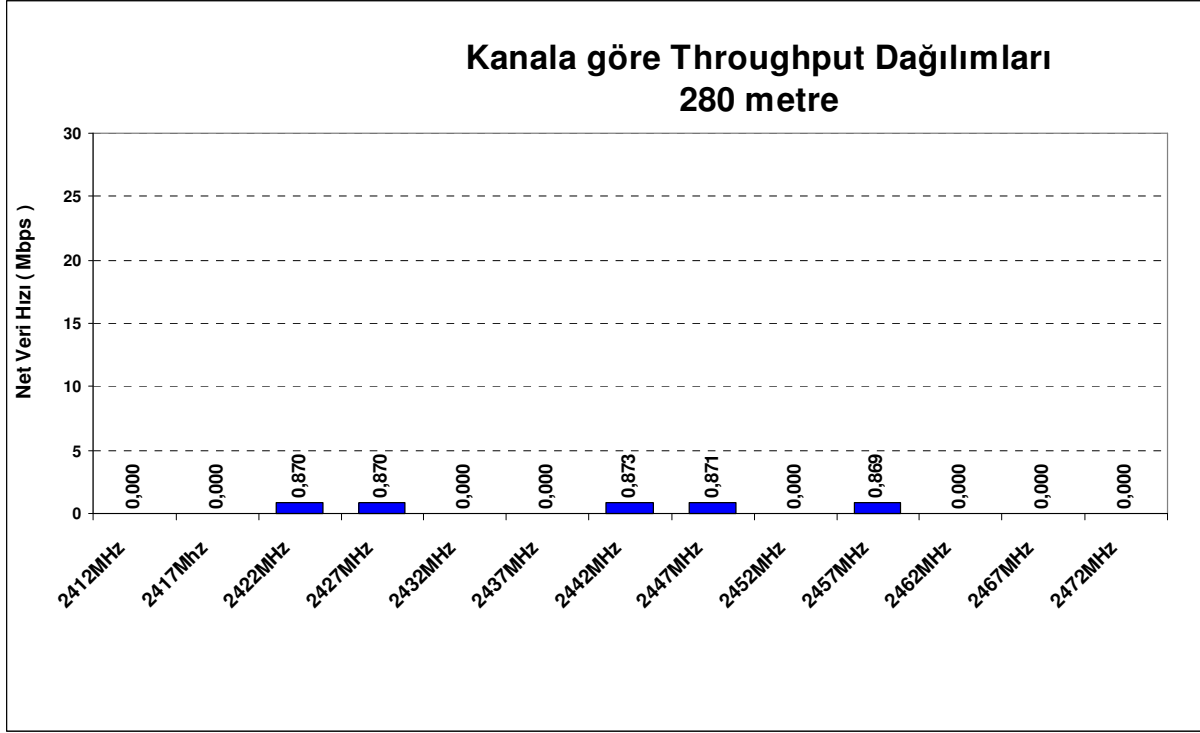
d=260 metre için:



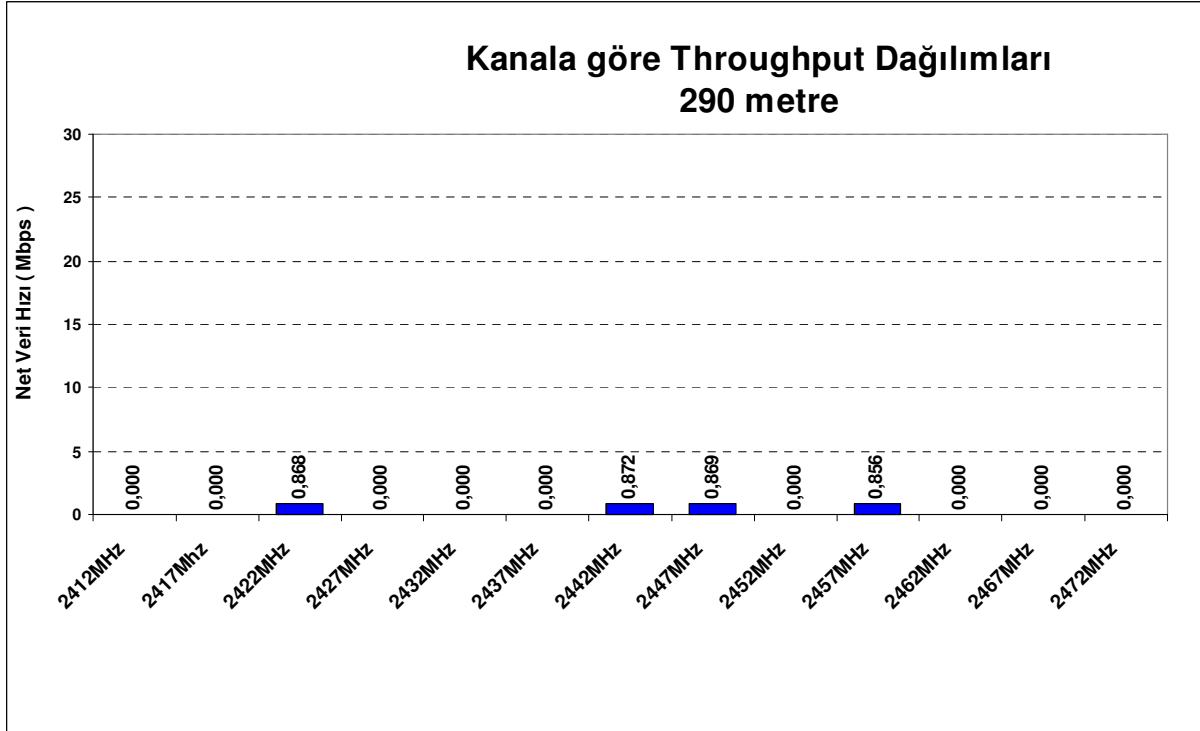
d=270 metre için:



d=280 metre için:



d=290 metre için:



**Ek 4: SNR / Net Veri Hızı Tablosu**

| SNR (dBm) | Net Veri Hızı (Mbps) |
|-----------|----------------------|
| 52        | 21,516               |
| 52        | 21,759               |
| 50        | 21,34                |
| 49        | 21,726               |
| 49        | 21,312               |
| 48        | 21,62                |
| 47,5      | 21,63                |
| 47,5      | 21,476               |
| 47,5      | 21,223               |
| 44,5      | 20,967               |
| 41        | 19,358               |
| 40        | 17,211               |
| 37        | 15,62                |
| 31,954    | 21,48                |
| 31,954    | 21,498               |
| 29,954    | 20,196               |
| 28,954    | 21,622               |
| 28,954    | 21,174               |
| 27,954    | 21,579               |
| 27,454    | 21,288               |
| 27,454    | 21,282               |
| 27,454    | 20,532               |
| 25,934    | 20,175               |
| 25,934    | 19,599               |
| 24,454    | 20,852               |
| 23,934    | 19,874               |
| 22,934    | 21,263               |
| 22,934    | 20,764               |
| 22,412    | 18,916               |
| 22,412    | 19,085               |
| 21,934    | 21,482               |
| 21,434    | 21,238               |
| 21,434    | 19,637               |
| 21,434    | 19,981               |
| 20,954    | 19,012               |
| 20,412    | 19,234               |
| 19,954    | 17,028               |
| 19,913    | 18,723               |
| 19,913    | 19,009               |
| 19,412    | 19                   |
| 19,412    | 18,803               |
| 18,434    | 19,115               |
| 18,412    | 19,279               |

|        |        |
|--------|--------|
| 17,975 | 18,667 |
| 17,975 | 18,745 |
| 17,913 | 19,037 |
| 17,912 | 19,384 |
| 17,912 | 19,11  |
| 17,912 | 19,924 |
| 16,954 | 15,564 |
| 16,913 | 18,984 |
| 16,913 | 18,611 |
| 16,391 | 16,567 |
| 16,391 | 16,673 |
| 15,975 | 18,877 |
| 15,913 | 19,225 |
| 15,413 | 19,263 |
| 15,413 | 18,89  |
| 15,413 | 18,728 |
| 15,053 | 16,437 |
| 15,053 | 16,255 |
| 14,975 | 18,81  |
| 14,975 | 18,533 |
| 14,934 | 18,775 |
| 14,912 | 18,843 |
| 14,391 | 15,963 |
| 13,975 | 19,21  |
| 13,934 | 16,088 |
| 13,893 | 15,082 |
| 13,893 | 16,182 |
| 13,475 | 18,997 |
| 13,475 | 18,82  |
| 13,475 | 18,572 |
| 13,391 | 15,971 |
| 13,391 | 16,507 |
| 13,053 | 15,935 |
| 12,87  | 13,019 |
| 12,87  | 12,934 |
| 12,413 | 18,697 |
| 12,391 | 14,597 |
| 12,053 | 15,728 |
| 12,053 | 16,405 |
| 11,954 | 12,984 |
| 11,954 | 12,933 |
| 11,893 | 15,8   |
| 11,891 | 15,663 |
| 11,891 | 15,337 |
| 11,891 | 16,164 |
| 11,412 | 18,482 |
| 11,127 | 12,894 |
| 11,127 | 12,815 |

|        |        |
|--------|--------|
| 11,053 | 14,379 |
| 10,934 | 14,617 |
| 10,893 | 15,594 |
| 10,893 | 16,274 |
| 10,87  | 13,086 |
| 10,553 | 15,487 |
| 10,553 | 15,26  |
| 10,553 | 15,765 |
| 10,475 | 18,634 |
| 10,412 | 15,79  |
| 10,371 | 10,757 |
| 10,371 | 10,464 |
| 9,954  | 13,063 |
| 9,893  | 14,268 |
| 9,87   | 12,721 |
| 9,87   | 12,943 |
| 9,676  | 10,733 |
| 9,676  | 10,394 |
| 9,393  | 14,867 |
| 9,393  | 15,179 |
| 9,393  | 15,45  |
| 9,127  | 12,799 |
| 9,032  | 10,698 |
| 9,032  | 10,39  |
| 8,954  | 12,696 |
| 8,954  | 12,691 |
| 8,913  | 17,406 |
| 8,891  | 16,223 |
| 8,87   | 12,904 |
| 8,433  | 7,842  |
| 8,433  | 7,852  |
| 8,371  | 10,648 |
| 8,37   | 13,026 |
| 8,37   | 12,992 |
| 8,37   | 12,639 |
| 8,127  | 11,26  |
| 8,127  | 12,366 |
| 7,954  | 12,897 |
| 7,913  | 15,73  |
| 7,872  | 7,727  |
| 7,872  | 7,819  |
| 7,676  | 10,597 |
| 7,553  | 16,028 |
| 7,454  | 12,973 |
| 7,454  | 12,974 |
| 7,454  | 11,798 |
| 7,412  | 13,895 |
| 7,371  | 10,515 |

|       |        |
|-------|--------|
| 7,371 | 10,723 |
| 7,346 | 7,638  |
| 7,346 | 7,723  |
| 7,127 | 12,719 |
| 7,032 | 10,568 |
| 6,975 | 17,259 |
| 6,849 | 6,333  |
| 6,849 | 6,262  |
| 6,676 | 10,503 |
| 6,676 | 10,632 |
| 6,627 | 12,962 |
| 6,627 | 12,809 |
| 6,627 | 11,733 |
| 6,433 | 7,804  |
| 6,393 | 15,923 |
| 6,379 | 6,308  |
| 6,379 | 6,244  |
| 6,371 | 10,557 |
| 6,032 | 10,4   |
| 6,032 | 10,472 |
| 5,975 | 15,558 |
| 5,934 | 6,291  |
| 5,934 | 6,224  |
| 5,872 | 7,792  |
| 5,871 | 9,793  |
| 5,871 | 10,64  |
| 5,871 | 10,375 |
| 5,676 | 10,459 |
| 5,51  | 3,949  |
| 5,51  | 3,927  |
| 5,433 | 7,79   |
| 5,433 | 7,355  |
| 5,391 | 16,811 |
| 5,37  | 12,859 |
| 5,346 | 7,767  |
| 5,176 | 9,645  |
| 5,176 | 10,577 |
| 5,176 | 10,294 |
| 5,106 | 3,926  |
| 5,106 | 3,871  |
| 5,032 | 10,308 |
| 4,913 | 13,703 |
| 4,872 | 7,766  |
| 4,872 | 7,315  |
| 4,849 | 6,314  |
| 4,72  | 3,875  |
| 4,72  | 3,859  |
| 4,532 | 9,587  |

|       |        |
|-------|--------|
| 4,532 | 10,497 |
| 4,532 | 10,265 |
| 4,454 | 12,753 |
| 4,433 | 7,793  |
| 4,391 | 15,369 |
| 4,379 | 6,309  |
| 4,35  | 1,519  |
| 4,35  | 1,528  |
| 4,346 | 7,752  |
| 4,346 | 7,29   |
| 4,053 | 16,532 |
| 3,996 | 1,482  |
| 3,996 | 1,525  |
| 3,934 | 6,281  |
| 3,933 | 7,758  |
| 3,933 | 7,768  |
| 3,933 | 8,791  |
| 3,872 | 7,784  |
| 3,849 | 6,303  |
| 3,849 | 6,242  |
| 3,655 | 1,467  |
| 3,655 | 1,518  |
| 3,627 | 12,576 |
| 3,51  | 3,904  |
| 3,379 | 6,299  |
| 3,379 | 6,228  |
| 3,372 | 7,683  |
| 3,372 | 7,754  |
| 3,372 | 7,755  |
| 3,346 | 7,473  |
| 3,327 | 0,874  |
| 3,327 | 0,872  |
| 3,106 | 3,881  |
| 3,053 | 15,358 |
| 3,011 | 0,873  |
| 3,011 | 0,871  |
| 2,975 | 13,468 |
| 2,934 | 6,296  |
| 2,934 | 6,168  |
| 2,893 | 16,382 |
| 2,871 | 10,435 |
| 2,849 | 6,327  |
| 2,846 | 6,763  |
| 2,846 | 7,707  |
| 2,846 | 7,657  |
| 2,72  | 3,851  |
| 2,707 | 0,872  |
| 2,707 | 0,869  |

|       |        |
|-------|--------|
| 2,51  | 3,887  |
| 2,51  | 3,925  |
| 2,379 | 6,32   |
| 2,35  | 1,537  |
| 2,349 | 6,163  |
| 2,349 | 6,113  |
| 2,349 | 6,114  |
| 2,176 | 10,138 |
| 2,106 | 3,876  |
| 2,106 | 3,859  |
| 1,996 | 1,506  |
| 1,934 | 6,315  |
| 1,893 | 12,601 |
| 1,879 | 5,897  |
| 1,879 | 5,812  |
| 1,879 | 6,109  |
| 1,87  | 11,907 |
| 1,72  | 3,871  |
| 1,72  | 3,846  |
| 1,655 | 1,46   |
| 1,532 | 9,898  |
| 1,51  | 3,86   |
| 1,434 | 5,798  |
| 1,434 | 5,268  |
| 1,434 | 6,109  |
| 1,391 | 12,255 |
| 1,35  | 1,544  |
| 1,35  | 1,486  |
| 1,327 | 0,872  |
| 1,106 | 3,859  |
| 1,011 | 0,87   |
| 1,01  | 3,869  |
| 1,01  | 3,887  |
| 1,01  | 3,929  |
| 0,996 | 1,524  |
| 0,996 | 1,479  |
| 0,954 | 11,424 |
| 0,933 | 7,563  |
| 0,87  | 12,22  |
| 0,72  | 3,833  |
| 0,707 | 0,868  |
| 0,655 | 1,443  |
| 0,655 | 1,397  |
| 0,606 | 3,855  |
| 0,606 | 3,872  |
| 0,606 | 3,884  |
| 0,372 | 7,368  |
| 0,35  | 1,503  |

|        |        |
|--------|--------|
| 0,327  | 0,873  |
| 0,327  | 0,869  |
| 0,22   | 3,839  |
| 0,22   | 3,756  |
| 0,22   | 3,867  |
| 0,127  | 11,329 |
| 0,053  | 11,827 |
| 0,011  | 0,87   |
| 0,011  | 0,869  |
| -0,004 | 1,502  |
| -0,046 | 11,072 |
| -0,15  | 1,454  |
| -0,15  | 1,499  |
| -0,15  | 1,466  |
| -0,154 | 6,899  |
| -0,293 | 0      |
| -0,293 | 0,856  |
| -0,345 | 1,408  |
| -0,504 | 0      |
| -0,504 | 0      |
| -0,504 | 0      |
| -0,629 | 0      |
| -0,651 | 0      |
| -0,673 | 0      |
| -0,845 | 0      |
| -0,845 | 0      |
| -0,845 | 0      |
| -0,845 | 0      |
| -0,873 | 0      |
| -0,989 | 0      |
| -1,107 | 0      |
| -1,121 | 0      |
| -1,173 | 0      |
| -1,173 | 0      |
| -1,173 | 0      |
| -1,173 | 0      |
| -1,293 | 0      |
| -1,324 | 0      |
| -1,489 | 0      |
| -1,489 | 0      |
| -1,489 | 0      |
| -1,566 | 0      |
| -1,629 | 0      |
| -1,793 | 0      |
| -1,793 | 0      |
| -1,793 | 0      |
| -1,968 | 0      |
| -1,99  | 0      |
| -2,13  | 0      |
| -2,324 | 0      |

|        |   |
|--------|---|
| -2,394 | 0 |
| -2,567 | 0 |
| -2,78  | 0 |
| -2,968 | 0 |
| -3,046 | 0 |
| -3,128 | 0 |
| -3,15  | 0 |
| -3,504 | 0 |
| -3,567 | 0 |
| -3,654 | 0 |
| -3,845 | 0 |
| -3,873 | 0 |
| -4,128 | 0 |
| -4,151 | 0 |
| -4,173 | 0 |
| -4,489 | 0 |
| -4,621 | 0 |
| -4,629 | 0 |
| -4,654 | 0 |
| -4,793 | 0 |
| -5,066 | 0 |
| -5,151 | 0 |
| -5,324 | 0 |
| -5,49  | 0 |
| -5,621 | 0 |
| -5,894 | 0 |
| -5,968 | 0 |
| -6,066 | 0 |
| -6,28  | 0 |
| -6,49  | 0 |
| -6,567 | 0 |
| -6,65  | 0 |
| -6,894 | 0 |
| -7,004 | 0 |
| -7,128 | 0 |
| -7,28  | 0 |
| -7,345 | 0 |
| -7,65  | 0 |
| -7,654 | 0 |
| -7,673 | 0 |
| -7,989 | 0 |
| -8,004 | 0 |
| -8,151 | 0 |
| -8,293 | 0 |
| -8,345 | 0 |
| -8,621 | 0 |
| -8,673 | 0 |
| -8,989 | 0 |

|         |   |
|---------|---|
| -9,066  | 0 |
| -9,293  | 0 |
| -9,49   | 0 |
| -9,894  | 0 |
| -10,28  | 0 |
| -10,65  | 0 |
| -11,004 | 0 |
| -11,345 | 0 |
| -11,673 | 0 |
| -11,989 | 0 |
| -12,293 | 0 |

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 08.05.1982

Doğum yeri İzmir

Lise 1997-2000 Karabük Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2004 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2004- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü

**Çalıştığı kurumlar**

2004-2004 Eltek Mühendislik A.Ş..  
2004- AirTies Wireless Networks