

## Kablosuz Yerel Alan Ağlarında Güncel Gelişmeler: IEEE 802.11ac ile Yeni Nesil Gigabit Wi-Fi

Hakkı Soy<sup>1</sup>, Özgür Özdemir<sup>2</sup>, Mehmet Bayrak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karaman

<sup>2</sup> Fatih Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>3</sup> Mevlana, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya

hakkisoy@kmu.edu.tr, oozdemir@fatih.edu.tr, mbayrak@mevlana.edu.tr

**Özet:** Bu çalışmada IEEE 802.11 standartlarının gelişme süreci, 802.11n ve 802.11ac standartlarının sahip olduğu özelliklere öngörü sağlanmıştır. 802.11n kablolu bağlantı performansına yakın karşılaştırılabilir hız artışı vaadi ile kablosuz yerel alan ağları (WLANs) için en son düzenlenen 802.11 standardıdır. 802.11n standardı interaktif multimedya uygulamaları desteklemek üzere MIMO ve OFDM teknolojilerini kullanır. Daha önceki 802.11g (Kablosuz G) standardı ile geçmişe dönük uyumluluğa ek olarak 802.11n (Kablosuz N) standardı genişletilmiş WLAN kapsama alanı sunar. Diğer taraftan, geliştirme aşamasındaki yeni 802.11ac standardı hız, güvenilirlik ve servis kalitesi bakımından olağanüstü bir gelişme vaat eder. Ayrıca kablosuz ağlar alanında bugün bildiklerimizin çehresini değiştirecek yeni teknolojiler ana hatlarıyla özetlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Kablosuz Yerel Alan Ağları, IEEE 802.11ac, MIMO, OFDM.

### Recent Advances in Wireless Local Area Networks (WLANs): Next Generation Gigabit Wi-Fi with IEEE 802.11ac

**Abstract:** In this study, we provide insight into the development process of IEEE 802.11 standards, the benefits of 802.11n and 802.11ac standards. The 802.11n is the latest amendment to the 802.11 standard for wireless local area networks (WLANs) with promise to increase speed comparable to wire-line performance. The 802.11n standard employs MIMO and OFDM technologies to support interactive multimedia applications. In addition to backward compatibility with the previous 802.11g (Wireless G) standard, the 802.11n (Wireless N) standard also offers extended WLAN coverage. On the other hand, the new 802.11ac standard under development promises extraordinary improvements in speed, reliability, and service quality. Besides, we also outline the new technologies coming along that could change the face of what we know today in this wireless networking space.

**Keywords:** WLANs, IEEE 802.11ac, MIMO, OFDM

#### 1. Giriş

Son yirmi yılda internet kullanımının hızla yayılımında önemli kilometre taşlarından biri 56 Kbps veri hızına sahip çevirmeli (dial-up) modemler yerini bağlantı hızını birkaç Mbps'a çıkaran xDSL ve kablolu modemlere bırakmasıdır. Ev ve ofislerde yüksek hızlı internet bağlantısının yaygın olarak kullanılmaya başlaması ile birlikte özellikle dizüstü bilgisayar kullanımının giderek yaygınlaşması kablosuz ağ erişimine olan ilgiyi de beraberinde getirmiştir. Kablosuz ağların gelişimi bilgisayar ağları ve kablosuz haberleşme teknolojilerinin birlikte kullanımı sonucunda ortaya çıkmıştır. Bilgisayarların birbirleriyle bir ağ üzerinden haberleşmesini sağlamak üzere çeşitli firmalar tarafından geliştirilen cihazlar başlangıçta yüksek maliyetleri nedeniyle fazla talep görmese de kablosuz internet erişiminde temel problem farklı üreticiler tarafından üretilen ürünlerin birbirleriyle uyumsuzluğudur. Ağa bağlı cihazların birlikte çalışabilirliğini sağlamak üzere çeşitli standardizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyulmuştur.

#### 2. IEEE 802.11 Standartlarının Gelişimi

Kablosuz yerel alan ağları ile ilgili konularda yaşanan uyum problemlerinin çözümü için IEEE tarafından 1997 yılında 802.11 standart grubu oluşturulmuş ve bu grup tarafından 802.11x şeklinde sona eklenen harfler ile belirlenen çeşitli standartlar geliştirilmiştir. Başlangıçta frekans atlamalı dağınık spektrum (FHSS), düz sıralı dağınık spektrum (DSSS) ve kızıl ötesi (IR) gibi fiziksel katman teknikleri yardımı ile tanımlanan 802.11 standardı sadece 1-2 Mbps veri hızını destekleyecek yeterliliktedir. Bu tekniklerden ilk ikisi ISM olarak isimlendirilen lisanssız 2,4 GHz frekans bandını kullanır. Daha sonra aynı anda çalışmalarını yürüten 802.11b ve 802.11a çalışma grupları tarafından ortaya koyulan genişletilmiş protokoller ile çeşitli iyileştirmeler yapılarak mevcut 802.11 standardı yeniden düzenlenmiştir [1].

802.11b standardı DSSS ile tanımlanan fiziksel katman üzerinde tamamlayıcı kod anahtarlama (CCK) modülasyon planı kullanılarak veri hızının 11 Mbps'a çıkmasını sağlar. Sunduğu avantajlar sebebiyle ev ve ofis kullanımında 802.11b standardı ile uyumlu cihazlar hızla yaygınlaşmıştır. Özellikle diz üstü

bilgisayarların 802.11b uyumlu adaptörler kullanılarak kablosuz ağlara bağlantı kurmasıyla 1999 yılında geniş ölçekte kabul edilen ilk kablosuz ağ standardı olmuştur. Buna paralel olarak 802.11b uyumlu cihazlar üreten üreticilerin uyumluluk problemlerini ortadan kaldırmak üzere oluşturdukları WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) grubu 2002 yılında ismini Wi-Fi (Wireless Fidelity) Alliance olarak değiştirmiştir. IEEE 802.11 standardı ile uyumlu kablosuz yerel alan ağlarının anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak için Wi-Fi Alliance tarafından Wi-Fi® markası oluşturulmuştur. Diğer taraftan 802.11a standardı çok daha etkili ve buna karşın daha karmaşık dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) radyo iletim tekniği ile yeni bir fiziksel katman tanımlar. OFDM ile farklı frekanslarda çok taşıyıcı veri transferi gerçekleştirildiğinden maksimum hız 54 Mbps'a yükseltilmiştir [2].

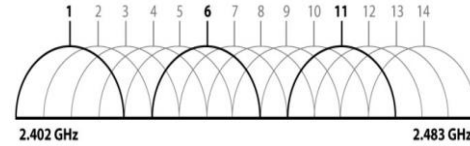
Kablosuz ağlarda en önemli problemlerden biri veri hızının önceden kesin olarak bilinmemesidir. Kablolular Ethernet bağlantısı düzenli olarak 100 Mbps veri transfer hızı sağlayacak yeterlilikte iken sinyal üzerinde girişim ve zayıflama etkisi gibi problemler nedeniyle kablosuz ağ cihazları için veri transfer hızı kanal şartlarına bağlı olarak anlık değişir. Tanımlanan standartlar için belirtilen hız değerleri teorik üst sınır olup pratikte 802.11b standardında 5 Mbps, 802.11a standardında ise 20 Mbps değerinin üzerine çıkılması çoğu zaman mümkün olmaz [3].

802.11a standardının yaygın kullanımının önündeki engel taşıyıcı frekansının 5 GHz olmasıdır. Her ne kadar 802.11b standardı ile farklı frekanslarda çalışmasından dolayı girişim etkisi olmaksızın birlikte çalışabilirlik sağlansa da OFDM kullanımını destekleyecek cihazların maliyetinin yüksek olması 802.11a standardının geniş ölçekli kullanımını engellemiştir. Ayrıca 802.11a standardında çalışma frekansının yüksekliği sebebiyle elektromanyetik dalgaların önüne çıkan duvar gibi engellerin içinden geçiş yeteneğinin kısıtlı olması bir diğer dezavantajdır. 2003 yılında geliştirilen 802.11g standardı ile 802.11a standardı gibi fiziksel katmanda OFDM kullanılarak veri hızı 54 Mbps'a yükseltilirken taşıyıcı frekansı 802.11b standardı gibi 2,4 GHz belirlenmiştir [1].

802.11g standardı kullanımını cazip kılan en önemli avantajı 802.11b standardı kullanan mevcut cihazlar ile geriye doğru uyumluluk sunmasıdır. Bu durumda 802.11g uyumlu bir dizüstü bilgisayar 802.11b uyumlu kablosuz modem ile bağlantı kurduğunda çalışma özellikleri 802.11b standardına göre belirlenir. Bunun yanında 802.11a/b veya 802.11a/g gibi birbiriyle uyumsuz birden fazla standardı destekleyecek özellikte çift bant cihazlarda mevcuttur. Bu tip cihazlar üzerinde her bir çalışma bandı için bağımsız radyo alıcı/verici ve anten bulunduğundan maliyetinin yüksek olmasına karşın aynı anda her iki bantta ağ erişimi gerçekleşir.

802.11b ve 802.11g standartlarında 2,4 GHz çalışma frekansı 2401-2473 MHz aralığında 70 MHz bant

genişliğine sahip olsa da tek bir kablosuz cihaz tarafından kullanılan bant genişliği sadece 20 MHz'dir. Cihazın çalıştığı frekans aralığının merkezini belirtmek için kanal numaraları kullanılır. Ev ve ofis ortamlarında kurulan kablosuz ağlarda seçilen kanalın numarası erişim noktası tarafından belirtilir. Bunun için 5 MHz boşluklarla 11 farklı kanal oluşturulmuştur. Şekil 1'de gösterildiği gibi 14 adet kanal tanımlanmış olup 20 MHz bant genişliğinde birbirinden bağımsız üç farklı kablosuz kanal (1, 6 ve 11 gibi) aynı anda birbiri üzerinde girişim etkisi olmadan kullanılabilir [3].



**Şekil 1. 802.11b/g frekans spektrum kullanımı**

Ağ içindeki kullanıcı ihtiyaçlarının büyük bir kısmı 802.11g standardı ile sağlansa da birden fazla kullanıcı tarafından eş zamanlı olarak video aktarımı gibi multimedya uygulamalar için gerekli olan veri hızı ve servis kalitesinin karşılanması amacıyla 2003 yılı sonlarında 802.11n standardı özellikleri geliştirilmesi yönünde çalışmalar başlamıştır. Bu çalışmaların başlangıcında veri hızının G standardı için geçerli 54 Mbps değerinden 100 Mbps'a çıkarılması hedeflenirken 802.11 standardının gelişimine katkıda bulunmak üzere çeşitli firmalar tarafından çok sayıda öneri getirilmiştir. 2005 yılında ikiye düşürülen bu önerilerden biri WWiSE grubu diğeri ise TGn Sync grubu tarafından ortaya koyulmuştur.

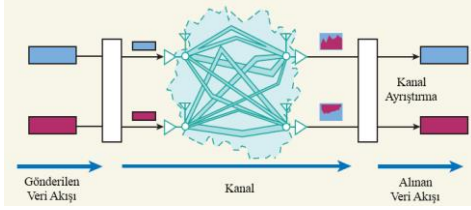
WWiSE tarafından getirilen öneride mevcut 20 MHz bant genişliğinde kanallar yanında çoklu antenler kullanılarak 135 Mbps veri hızı amaçlanmıştır. Diğer taraftan TGn Sync grubu mevcut bant genişliğinin 40 MHz'e çıkartılmasını ve gelişmiş sinyal işleme teknikleri kullanımı ile 315 Mbps veri hızının gerçekleştirilmesini planlamıştır. Sonraki dönemde bazı eklentiler ile yenilikler yapılsa bile önerilerin ikisi de 802.11n standardı için yeterli desteği görmemiştir. 2006 yılında her iki grup üyelerinin birlikte kurdukları ortak grubun gelen önerileri birleştirilerek temelini attıkları IEEE 802.11n standardı 2009 yılı Eylül ayında onaylanmıştır [2, 4].

	802.11g	802.11n
Maksimum Veri Hızı	54 Mbps	600Mbps
Radyo Frekansı	2.4 GHz	2.4 GHz / 5 GHz
Uzaysal Veri Akışı Sayısı	1	1, 2, 3, 4
Kanal Bant Genişliği	20 MHz	20 MHz / 40 MHz

**Tablo 1. 802.11g / 802.11n karşılaştırması**

### 3. 802.11n Standardı

802.11n standardı hem 2,4 GHz hem de 5 GHz çalışma frekansını desteklerken OFDM yanında veri transfer hızını artırarak artırarak amacıyla çoklu-giriş, çoklu-çıkış (multiple-input, multiple-output, MIMO) teknolojisi ve 40 MHz genişliğinde kanallar kullanır. MIMO sistemlerde alıcı ve verici üzerinde çoklu antenlerin kullanımı ile eş zamanlı olarak farklı sinyallerin gönderilip alınmasına olanak sağlayan uzaysal çoğullama (spatial multiplexing) tekniğinden faydalanılır. Böylece farklı antenlerden aynı anda gönderilen sinyaller ile aynı spektral kanal üzerinde birbirine paralel farklı uzaylarda veri aktarımı gerçekleştirilir [4].



Şekil 2. 2x2 MIMO sistem blok diyagramı

Uzaysal çoğullama tekniği ile farklı alıcı ve verici antenler arasında uzayların her biri uzaysal akış (spatial stream) olarak isimlendirilir. Örneğin verici üzerinde anten sayısının ikiye çıkartılırsa ile uzaysal akışı sayısı da ikiye çıkartılarak veri hızının iki kat artırılması sağlanabilir. 802.11n standardı ile erişim noktası ve istemci üzerindeki anten sayısı kadar uzaysal veri akışı oluşturulabilir. Ayrıca sinyal kalitesini yükseltmek amacıyla erişim noktasında uzaysal akış sayısından fazla sayıda anten kullanılabilir [1, 4].

802.11n standardında bant genişliği 20 MHz olan kanallar yanında kanal birleştirme (channel bonding) tekniğiyle birbirine komşu kanalların birleştirilerek 40 MHz bant genişliğinde kanallar sayesinde iki kat daha fazla veri hızı sunar [5]. 5 GHz frekansında 40 MHz genişliğinde çok sayıda kanal bulunurken kısıtlı olan birkaç kanal hariç bunlar birbirleri ile örtüşmeden kullanılabilir. Buna karşın 2,4 GHz çalışma frekansında kanal sayısının sınırlı olması 40 MHz kanal kullanımını elverişsiz kılar. 2,4 GHz frekansı için 20 MHz bant genişliğinde birbiriyle örtüşmeyen sadece üç kanal varken bant genişliği 40 MHz'e çıktığında bu üç kanaldan sadece ikisi kullanılabilirdiğinden haberleşme kapasitesi düşer [5].

802.11g standardı için 20 MHz bant genişliğinde maksimum veri hızı 54 Mbps iken 802.11n standardında özellikle mobil telefon ve PDA gibi fiziksel boyutları kısıtlı cihazlar için alıcı ile vericide tek anten olduğu durumda (1x1 konfigürasyon) 20 MHz için 65 Mbps ve 40 MHz için 150 Mbps veri hızı elde edilir. MIMO tekniği kullanılarak 2x2 anten konfigürasyonunda 300 Mbps, 3x3 anten

konfigürasyonunda 450 Mbps veri hızına ulaşılması mümkündür. Maksimum veri hızı 40 MHz bant genişliği için OFDM sembolleri arasındaki koruma zaman aralığının 800 ns'den 400 ns'ye düşürüldüğünde ve 4x4 anten konfigürasyonu ile elde edilebilecek 600 Mbps değeridir. 4x4 anten konfigürasyonu ev ve ofis kullanımı dışında yüksek hızlı bağlantılar kurmak üzere özel amaçlı ve pahalı cihazlar kullanılarak oluşturulur [3].

MIMO Konfigürasyon	Maksimum Hız (20 MHz)	Maksimum Hız (40 MHz)
1x1	65-72 Mbps	150 Mbps
2x2	130-144 Mbps	300 Mbps
3x3	195-216 Mbps	450 Mbps
4x4	260-288 Mbps	600 Mbps

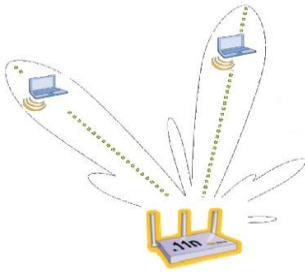
Tablo 2. MIMO için maksimum veri hızı

802.11n standardı 20 MHz ve 40 MHz bant genişliğinde 1'den 15'e kadar numara ile sıralanan farklı modülasyon ve kodlama planları içerir. Tablo 3'de görüldüğü gibi 8 ile 15 arasındaki planlarda iki uzaysal veri akışı kullanılır [6]. Bina içi iletim ortam şartlarına bağlı olarak (alıcı ve verici arasındaki engellere göre alınan güç ve girişim seviyesi) anlık veri hızını kablosuz bağlantı kalitesine adapte etmek üzere bir plandan diğerine geçilir. Uygun modülasyon ve kodlama planı seçiminde bağlantı kalitesinin anlık değişimini göz önünde tutmak üzere paket hata oranı değeri dikkate alınır. Veri transferinin güvenli olarak gerçekleştirilmesi için paket hata oranının belirli bir standart eşik seviyesinin üzerinde olması gerekir. Bu sebepten kanal şartları kötü olduğunda daha düşük seviyeli modülasyon ve kodlama planlarına geçiş yapılarak hız gerektiği kadar düşürülür [4, 6].

Modülasyon Kodlama Planı	Kod Oranı	Modülasyon	Uzaysal Veri Akışı Sayısı	Maksimum Veri Hızı (20 MHz)	Maksimum Veri Hızı (40 MHz)
0	1/2	BPSK	1	6,5	13,5
1	1/2	QPSK	1	13	27
2	3/4	QPSK	1	19,5	40,5
3	1/2	16-QAM	1	26	54
4	3/4	16-QAM	1	39	81
5	2/3	64-QAM	1	52	108
6	3/4	64-QAM	1	58,5	121,5
7	5/6	64-QAM	1	65	135
8	1/2	BPSK	2	13	27
9	1/2	QPSK	2	26	54
10	3/4	QPSK	2	39	81
11	1/2	16-QAM	2	52	108
12	3/4	16-QAM	2	78	162
13	2/3	64-QAM	2	104	216
14	3/4	64-QAM	2	117	243
15	5/6	64-QAM	2	130	270

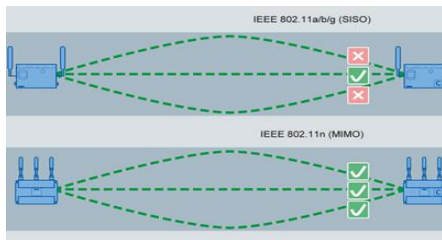
Tablo 3. 802.11n modülasyon planları

802.11n standardı MIMO desteği sayesinde verici hüzmeye biçimlendirme (transmit beamforming) ve uzaysal çeşitleme (spatial diversity) teknikleri kullanılarak performans artışı sunar. Verici hüzmeye biçimlendirme sayısal sinyal işleme (DSP) yardımıyla radyo sinyallerini doğrudan alıcı antene yönlendirerek kablosuz ağın kapsama sahasının genişletilmesi üzerine yoğunlaşır. Tek bir veri akışı ile çalışılan temel sistem düşünülürse farklı antenlerden gönderilen sinyallerin fazları değiştirilerek yön seçicilik (directivity) artırılabilir. Böylece alıcıda elde edilen sinyallerin birbirlerini güçlendirecek şekilde birleştirilmesi koordine edilerek bağlantı kalitesi yükseltilir. 802.11n standardı ayrıca Şekil 3’de gösterildiği gibi birden fazla veri akışının hedeflenen kullanıcılara yönlendirilmesine imkân sağlar [1, 7].



**Şekil 3.** Hüzmeye biçimlendirme kullanımı

802.11n standardı MIMO teknolojisi ile düzenli bir kapsama sahası oluştururken aynı veri hızında 802.11g standardına göre kapsama sahasını iki kattan fazlasına çıkarır. Şekil 4’de görüldüğü gibi uzaysal çeşitleme tekniği sönümleme sonucu meydana gelen çoklu yol yayılımı etkisinin ortadan kaldırılması için gönderilen sinyalin birden fazla kopyasını kullanarak alıcıda en iyi sinyalin elde edilmesini amaçlar. Böylece ölü nokta (dead spot) problemleri azaltılırken ağa bağlı kullanıcılar başta multimedya (video akışı ve VoIP gibi) uygulamalar olmak üzere yüksek bant genişliği gerektiren uygulamaları kullanabilirler [1, 8].



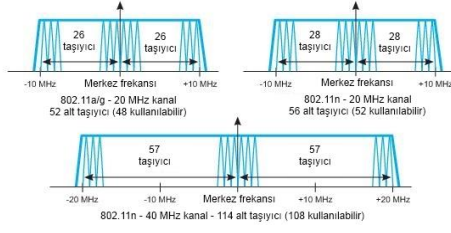
**Şekil 4.** Uzaysal çeşitleme kullanımı

802.11n standardı kalıtsal (legacy), karışık (mixed) ve yeşil saha (greenfield) olmak üzere üç farklı kipte çalışmak üzere yapılandırılabilir. Kalıtsal çalışma kipinde 802.11n kablosuz yönlendirici (router) cihaz ağ içinde tamamen 802.11a/b/g standardında istemcilerle çalışır. Bu kipte kanal birleştirme ve MIMO gibi özelliklerden faydalanılamaz. Karışık

kipte ise bunların yanında 802.11n istemciler yer alır. Pratikte en yaygın olarak kullanılan kip budur. Ağ içinde geleneksel tek-giriş, tek-çıkış (SISO) kanal kullanan 802.11a/g cihazlar bulunursa daha düşük hızlarla veri transferi gerçekleşeceğinden sistem kapasitesi azalır. Kalıtsal ve karışık çalışma kipinde ağ performansı uyumluluk probleminin çözümü için ağ içinde koruma mekanizması ile çalışacağından sistem performansı düşer. Yeşil saha kipinde ağ içindeki tüm istemciler 802.11n standardına sahiptir. Bu kipte 802.11a/b/g cihazlar için herhangi bir koruma yoktur [2, 4].

802.11a/g standartları 64QAM gibi yüksek dereceli modülasyon kullanımı ile sağlanan yüksek spektral verimlilik sayesinde maksimum 54 Mbps veri hızına ulaşır. Fakat 64QAM modülasyonu BPSK gibi basit modülasyon tekniklerine göre daha çok daha yüksek SNR’a ihtiyaç duyduğundan kapsama sahasında büyük bir kayıp ortaya çıkar. Ayrıca sistem yan kanal girişimine karşı daha savunmasız olacağından toplam sistem kapasitesi düşer. 802.11n standardında veri hızı ve kapsama sahasının geliştirilmesi için MIMO-OFDM anahtar teknik olarak kullanılabilir. Bu şekilde eş zamanlı olarak birden fazla sayıda veri akışı gönderilmesi sonucunda mevcut bant genişliğini artırmaya gerek kalmadan ve modülasyon derecesi düşürülmeden bağlantı kapasitesi önemli ölçüde yükseltilebilir [6, 8].

Çok taşıyıcılı iletimin özel bir biçimi olan OFDM tekniğinde geleneksel paralel veri iletim sistemlerinde olduğu gibi frekans bant genişliği birbirleriyle örtüşmeyen çok sayıda alt kanallara bölünür. Bu alt kanalların her birinde alt taşıyıcı adı verilen özel bir taşıyıcı sinyal kullanılarak veri sembolleri ile modüle edilir. Kanalların birbirlerine girişim etkisi yapmadan verilerin iletilmesi için alt taşıyıcı sinyaller arasında dikgenlik (orthogonality) şartının sağlanması gerekir. Alt kanallardaki modülasyon işlemleri sonucunda frekans çoğullamalı sinyal elde edilir. Çok taşıyıcılı olma özelliğinden dolayı OFDM tek taşıyıcılı modülasyon tekniklerine göre çok daha fazla veri hızı vaat eder. OFDM tekniğinde gönderilen veriler vericide ters Fourier dönüşümüyle (IFFT) modüle edilirken, alıcıda Fourier dönüşümü (FFT) ile tekrar demodüle edilir. 802.11n standardında alt taşıyıcı sayısı 20 MHz kanal için 48’den 52’ye yükseltilirken, 40 MHz için 108 alt taşıyıcı kullanılmıştır. Alt taşıyıcı sayısının artması veri taşımak üzere daha fazla sayıda kanal kullanılabilir kanal olduğu anlamını taşır ve böylece veri transfer hızı artar [4, 6].



Şekil 5. OFDM ile veri hızı artışı sağlanması

#### 4. 802.11ac Standardı

Kablosuz yerel alan ağlarının kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak yüksek performans beklentilerinin karşılanması için IEEE 802 Standartları komitesi tarafından oluşturulan yeni bir çalışma grubu (task group, TG) 802.11-2007 standardını oluşturmak amacıyla 2008 yılı Eylül ayında çalışmalarına başlamıştır. 802.11ac olarak bilinen standart tamamladığında kablosuz yerel alan ağlarında spektral verimliliğin iyileştirilmesi sonucunda kablolu ağlarla karşılaştırılabilir performansa ulaşılması hedeflenmektedir. 802.11ac çalışma grubu (TGac) tarafından yapılan çalışmalar sonucunda 2011 yılı Ocak ayında yeni standardın getirdiği teknolojileri tanımlayan ve özelliklerini belirleyen taslak ortaya çıkarılmıştır. Halen devam eden çalışmalar sonucunda 2013 yılı sonunda 802.11ac standardının onaylanması beklenmektedir [9].

Saniyede Gigabit (Gigabit-per-second, Gbps) veri transferi hızına ulaşan 802.11ac standardı sadece lisanssız 5 GHz frekans bandında çalıştığından girişimden daha az etkilenir. 802.11n standardı 2,4 GHz frekans bandında 20 MHz kanal bant genişliğinde birbirleriyle örtüşmeyen sadece 3 kanal kullanılırken 802.11ac standardında 23 kanal vardır. Performans artışı sağlanması için kanal bant genişliği, modülasyon planı ve uzaysal akış sayısı gibi bazı seçime bağlı (opsiyonel) parametreler tanımlanmıştır. Zorunlu (mandatory) parametreler (80 MHz bant genişliği, 1 uzaysal akış, 800 nano saniye uzun koruma aralığı ve 5/6 kod oranı ile 64QAM modülasyon) kullanılan 802.11ac cihaz için veri hızı yaklaşık 293 Mbps'dir. Eğer tüm opsiyonel parametreler uygulanırsa veri hızı (160 MHz bant genişliği, 8 uzaysal akış, 400 nano saniye kısa koruma aralığı ve 5/6 kod oranı ile 256 QAM modülasyon) veri hızı 7 Gbps değerine çıkarılabilir [10].

802.11ac standardı ile bugün yaygın olarak kullanılan 802.11n standardı tarafından desteklenen 20 MHz ve 40 MHz kanal bant genişliği yanında 80 MHz bant genişliğini destekler. Böylece birbirine komşu iki adet 40 MHz kanal birleştirilerek bant genişliği iki kat artırıldığında fiziksel katmanda veri hızı yaklaşık olarak iki katına çıkartılırken (~2.1x, %117 artış) aynı zamanda sistem verimliliği de yükseltilmiş olunur. Opsiyonel olarak komşu veya komşu olmayan iki adet 80 MHz kanal birleştirilerek 160 MHz kanal bant genişliği kullanıldığında veri hızı yaklaşık olarak dört katına çıkartılırken (4.2x, %333 artış) hem de daha

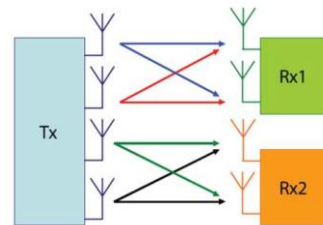
fazla kullanıcıya hizmet sunulması için önemli avantaj sağlar [11].

Haberleşme sistemlerinde veri hızı ve haberleşme kapasitesi artışı sağlamak için kullanılacak yöntemlerin başında daha yüksek dereceli modülasyon ile sembol başına taşınan bit sayısının artırılması gelir. 802.11ac standardında fiziksel katman daha önce yine OFDM tekniğine dayanır. 802.11ac standardında BPSK, QPSK, 16QAM ve 64QAM modülasyonu yanında opsiyonel olarak 80 MHz ve 160 MHz kanal bant genişliklerinde 3/4 ve 5/6 kodlama oranıyla 256QAM modülasyonu desteklenir. 256QAM ile 64QAM modülasyonuna göre ( $8/6=1,33$ ) %33 veri hızı artışı sağlanır [11]. 802.11ac standardında kullanılan modülasyon ve kodlama planı indisi (0-9) arasında olup sadece 10 farklı plan yer almaktadır.

Plan	Modülasyon	Kod Oranı
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4
7	64-QAM	5/6
8	256-QAM	3/4
9	256-QAM	5/6

Tablo 4. 802.11ac modülasyon planları

802.11n standardında maksimum dört uzaysal akış desteklenirken 802.11ac standardı sekize kadar uzaysal akış desteği içerir. Böylece 802.11ac standardında veri hızı iki katına (~2x, %100 artış) çıkarılır [11]. 802.11n standardında olduğu gibi 802.11ac standardı da verici hüzme biçimlendirme tekniğini destekler. Bunun ötesinde 802.11ac standardında tanımlanan MU-MIMO (Multi-User MIMO) tekniği ile hüzme biçimlendirme yeteneği daha ileriye taşınmıştır. Bu şekilde bir erişim noktası uzaysal çoğullama tekniğiyle farklı yönlerdeki çok sayıda istemci ile aynı frekans spektrumunda farklı uzaysal akışlar kullanarak eş zamanlı olarak haberleşebilir. Kablosuz ağlarda spektral verimliliğin yükseltilmesi açısından MU-MIMO tekniği büyük önem taşır [12].



Şekil 6. MU-MIMO ile veri hızı artışı

802.11ac standardı 5 GHz frekansında çalışan 802.11a ve 802.11n cihazlar ile geriye doğru uyumludur. 802.11ac standardı uyumlu bir erişim noktası servis verdiği hücre içinde haberleşme kapasitesini artırarak aynı sayıda istemciye 802.11n standardına göre kullanıcı başına daha fazla kapasite ile servis sağlar. Alternatif olarak kullanıcı başına aynı haberleşme kapasitesi ile daha fazla istemciye servis sunulabilir. Bu yetenekleri özellikle üniversite kampüsleri, konferans salonları, stadyumlar ve diğer ortak kullanıma açık alanlarda 802.11ac standardına oldukça cazip kılar [10].

## 5. Sonuç ve Öneriler

802.11n standardı ile MIMO ve OFDM tekniklerinin kullanılması kablosuz yerel alan ağlarının performansını hem veri transfer hızı hem de kapsama alanı bakımından önemli ölçüde artırmıştır. 802.11ac standardı ile uyumlu akıllı televizyonlar ve kablosuz oyun konsollarının kullanılmaya başlanmasıyla ev ve ofislerde birden fazla cihaza eş zamanlı yüksek çözünürlüklü (High Definition, HD) video aktarımı sağlanabilir. Ayrıca her ne kadar fiziksel boyutlarının yetersiz olması sebebiyle sadece 1×1 veya 2×2 MIMO anten konfigürasyonlarında kullanılsalar da akıllı telefon, PDA, tablet bilgisayarlar ve kablosuz bağlantı özelliğine sahip kameralar için 802.11ac standardı yüksek veri hızı yanında yüksek enerji verimliliği sebebiyle ideal çözüm olacaktır.

## 6. Kaynaklar

- [1] Paul, T.K. and Ogunfunmi, T., "Wireless LAN Comes of Age: Understanding the IEEE 802.11n Amendment", IEEE Circuits and Systems Magazine, 8(1):28-54 (2008).
- [2] Ansah, A.K., Kwantwi, T., Akotam, A.W., "Comparing Wireless N (IEEE 802.11n) and Wireless G (IEEE 802.11g) Standards in terms of Performance and Reliability", Proceeding of the World Congress on Engineering, London, U.K., 1741-1744, (2011)
- [3] Verenkoff, B., "Understanding and Optimizing 802.11n", Buffalo Technology, (2011).
- [4] Perahia, E., "IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology", IEEE Communications Magazine, 46(7): 48-55 (2008).
- [5] DeBeasi, P., "802.11n: The End of Ethernet?", Burton Group (Network and Telecom Strategies In-Depth Research Report), Utah, (2012).

[6] Nee, R., Jones, V.K., Awater G., Zelst, A., Gardner, J. and Steele, G., "The 802.11n MIMO-OFDM Standard for Wireless LAN and Beyond", Wireless Personal Communications, 37: 445-453 (2006).

[7] Vemuru, B., "Transmit Smart with Transmit Beamforming", Marvell Technology, Santa Clara, (2012).

[8] Ergen, M., "IEEE 802.11 Tutorial", University of California, Berkeley, (2002).

[9] "IEEE 802.11ac: What Does it Mean for Test? (White Paper)", LitePoint, (2012).

[10] "What to Expect from 802.11ac (White Paper)", Aruba Networks, (2012).

[11] "802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi (White Paper)", Cisco, (2012).

[12] "IEEE 802.11ac: Technical Overview and Challenges for Manufacturing Test (White Paper)", Aeroflex, (2012)