

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

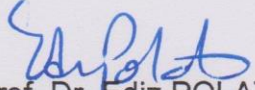
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEP TELEFONU ELEKTROMANYETİK İŞİMASININ  
İNSAN KULAK BÖLGESİNDE SEBEP OLDUĞU SICAKLIK  
ARTIŞININ TERMAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ, BULANIK  
C-ORTALAMA VE BEKLENTİ MAKSİMİZASYONU  
YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

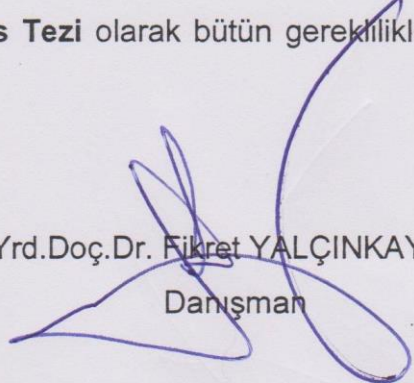
AHMET ÖZER

EYLÜL 2014

**Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında** Ahmet ÖZER tarafından hazırlanan CEP TELEFONU ELEKTROMANYETİK İŞİMASININ İNSAN KULAK BÖLGESİNDE SEBEP OLDUĞU SICAKLIK ARTIŞININ TERMAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ, BULANIK C-ORTALAMA VE BEKLENTİ MAKSİMİZASYONU YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

  
Prof. Dr. Ediz POLAT  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

  
Yrd.Doç.Dr. Fikret YALÇINKAYA  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr. İnan GÜLER

Üye (Danışman) : Yrd.Doç.Dr.Fikret YALÇINKAYA

Üye : Yrd.Doç.Dr. Eyüp TUNA

24/09/2014

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç.Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Sevgili Eşime ve Kızıma**

## ÖZET

CEP TELEFONU ELEKTROMANYETİK İŞİMASININ İNSAN KULAK BÖLGESİNDE SEBEP OLDUĞU SICAKLIK ARTIŞININ TERMAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİĞİ, BULANIK C-ORTALAMA VE BEKLENTİ MAKSİMİZASYONU YÖNTEMLERİ İLE ANALİZİ

ÖZER, Ahmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç.Dr. Fikret YALÇINKAYA

Eylül 2014, 132 sayfa

Cep telefonu haberleşmesi, elektromanyetik dalga vasıtasıyla sinyalin transfer edilmesi sonucu gerçekleşir. Cep telefonundan yayılan Elektromanyetik dalga, vücut tarafından emilir. Emilen elektromanyetik radyasyon, vücutta bazı somut ölçülebilir etkiler meydana getirir. Bu tez çalışmasında, cep telefonunun yetişkin bir insanın kulak ve yakın civarında bulunan yumuşak dokuda sebep olduğu **termal etki** incelenmiştir. Elektromanyetik radyasyonun emiliminden kaynaklanan insanın kulak ve etrafında meydana gelen termal etki, termal görüntüleme sistemleri ile görüntülenmiş ve analiz edilmiştir.

Farklı SAR değerlerine sahip iki cep telefonu GSM900 ve DCS1800 servisleri ile kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, üç temel unsurun etkisi incelenmiştir: Cep telefonu SAR (Özgül Soğurma Oranı) değerinin etkisi, çalışma frekansının etkisi ve her iki frekansın karma etkisi (Mixed Effect). Günümüzde iki farklı frekansın kullanıldığı (çift hatlı) cep telefonları olduğu gibi farklı servislerle kullanılan çok fazla sayıda cep telefonları da mevcuttur. Çift hatlı telefonlarda iki farklı frekans ardışık olarak kullanılabilir. Bu açıdan karma etkinin incelenmesi bu tür telefonların termal etkisi hakkında bilgi verecektir. Yapılan literatür araştırmasına göre **karma etkinin**

**incelenmediği görülmüştür.** Çalışma yöntemi şöyle özetlenebilir: Her seansı 50 dakika süren cep telefonu konuşması esnasında Flir firmasına ait SC640 model termal kamera ile görüntü kaydı alınmıştır. Alınan görüntüler, Termal görüntüleme tekniği (TGT), Bulanık C-Ortalama Algoritması (FCM) ve Beklenti Maksimizasyonu (EM) Algoritması ile ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Termal görüntüleme tekniği ile analiz yönteminde, her bir resim için kulak ve etrafındaki bölgede ortalama sıcaklık değeri ThermaCAM Researcher Professional 2.10 ile hesaplanarak yapılmıştır. Bulanık C-Ortalama Algoritması ve Beklenti Maksimizasyonu Algoritması ile kaydedilen her bir resim Matlab R2013b'de bölütlenmiştir. Bölütlenen resimlerde sıcak bölgeler tespit edilmiştir. Tüm resimlerde kulak ve yakın civarındaki sıcak bölgelerin tüm baş bölgesine göre yüzdesi hesaplanmış, incelenmiş ve yorumlanmıştır.

İlk çalışma, 900 MHz frekansta, 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda kulak ve etrafında 2,2 °C sıcaklık artışı olduğu, FCM ile elde edilen verilere göre sıcak bölgenin alanında % 2,5081 ve EM ile elde edilen verilere göre ise %2,7336 artış olduğu görülmüştür. İkinci çalışma, 900 MHz frekansta, 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda kulak ve etrafında 1,2 °C sıcaklık artışı olduğu, FCM ile elde edilen verilere göre sıcak bölgenin alanında % 0,5400 ve EM ile elde edilen verilere göre ise %0,8561 artış olduğu görülmüştür. Üçüncü çalışma, 1800 MHz frekansta, 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda kulak ve etrafında 1,2 °C sıcaklık artışı olduğu, FCM ile elde edilen verilere göre sıcak bölgenin alanında % 0,5070 ve EM ile elde edilen verilere göre ise %0,5452 artış olduğu görülmüştür. Dördüncü çalışma, 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun 1800 MHz ve 900 MHz frekanslarda ardışık kullanılması (karma etki) ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda, 900 MHz frekansta kulak ve etrafında 1,6 °C sıcaklık artışı olduğu, FCM ile elde edilen verilere göre sıcak bölgenin alanında % 1,5200 ve EM ile elde edilen verilere göre ise %1,4313 artış olduğu, 1800 MHz frekansta kulak ve etrafında 0,4 °C sıcaklık artışı olduğu, FCM ile elde edilen verilere göre

sıcak bölgenin alanında % 0,996 ve EM ile elde edilen verilere göre ise %0,8611 artış olduğu görülmüştür.

Yapılan analizler sonucunda, yüksek SAR değerine sahip cep telefonunun kulak ve etrafındaki dokuda, düşük SAR değerine sahip cep telefonuna göre daha fazla sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür. 900 MHz frekansta çalışan cep telefonunun kulak ve etrafındaki dokuda, 1800 MHz frekansta çalışan cep telefonuna göre daha fazla sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür. 900 MHz ve 1800 MHz frekansların sırası ile kullanılması (karma etki) sonucunda, 900 MHz frekansta kullanım sırasında 1800 MHz frekansta kullanıma göre daha fazla sıcaklık artışının olduğu görülmüştür. FCM ve EM ile elde edilen sonuçlara göre, tüm çalışmalarda elde edilen sıcak bölge alanlarındaki artış miktarlarının birbirine yakın ve birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca 4 çalışmada her üç yöntemle elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu ve birbirini desteklediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Karma Etki, Cep Telefonu, Termal Görüntüleme, SAR, Bulanık C-Ortalama Algoritması, Beklenti Maksimizasyonu Algoritması

## **ABSTRACT**

### **THE ANALYSIS OF TEMPERATURE RISES CAUSED BY ELECTROMAGNETIC RADIATION OF MOBILE PHONES IN NEAR EAR-SKULL REGION WITH THREE METHODS: THERMAL IMAGING TECHNIQUE, FUZZY C-MEANS ALGORITHM AND EXPECTATION MAXIMIZATION ALGORITHM**

OZER, Ahmet

Kirikkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fikret YALCINKAYA

September 2014, 132 pages

Mobile communication is a result of transferring information signal via electromagnetic waves. Electromagnetic waves are readily absorbed by the human body while using mobile phones. In this study, the thermal effects caused by mobile phones on the ear-skull region and its periphery have been investigated. Temperature rise occurring in the human near ear-skull region has been recorded, illustrated and analyzed with thermal imaging systems available.

Two mobile phones with different SAR values have been used with GSM 900 and DCS1800 mobile phones communication services. In this study, especially mixed effect of both frequencies of mobile communication was studied as it has not been investigated. Nowadays, dual-line mobile phones use both 900 MHz and 1800 MHz. In this respect, mixed effect tests disclose the thermal effects of dual-line mobile phones. The literature search, showed that mixed effect has not been studied before. Working method used is as follows: Successive records are regularly taken with Flir SC640 thermal camera during cell phone conversations for 50 minutes. Photos taken have

been analyzed with three methods: Thermal imaging technique (TIT), Fuzzy C-Means (FCM) Algorithm and Expectation Maximization (EM) Algorithm.

In analysis by the thermal imaging technique, the average temperature rise around the ear was calculated for all sequential records with ThermaCAM Researcher Professional 2.10. All photos are both segmented with FCM and EM Algorithm in Matlab 2013b. Hot regions in the segmented photos are detected. In all photos, the percentage was calculated and examined according to the head area or the hot region.

In this thesis, four studies were performed. The first experimental study has been carried out with the mobile phone having 0,793 W/kg SAR value and 900 MHz operating frequency. As a result of the study, it is observed that temperature in near ear-skull region is increased by a level of 2,2 °C degrees. Area of the hot region is expanded by % 2,5081 to the FCM data, by %2,7336 to the EM data. The second experimental study has been carried out with the mobile phone having 0,52 W/kg SAR value and 900 MHz operating frequency. As a result of the study, it is observed that temperature in near ear-skull region is increased by a level of 1,2 °C degrees. Area of the hot region is expanded by % 0,5400 to the FCM data, by % 0,8561 to the EM data. The third experimental study has been carried out with the mobile phone having 0,793 W/kg SAR value and 1800 MHz operating frequency. As a result of the study, it is observed that temperature in near ear-skull region is increased by a level of 1,2 °C degrees. Area of the hot region is expanded by % 0,5070 to the FCM data, by % 0,5452 to the EM data. The fourth experimental study has been carried out with the mobile phone having 0,793 W/kg SAR value and 900 and 1800 MHz operating frequency, respectively. As a result of the study, it is observed on 900 MHz study that temperature in near ear-skull region is increased by a level of 1,6 °C degrees. Area of the hot region is expanded by 1,5200% to the FCM data, by % 1,4813 to the EM data. It is observed on 1800 MHz study that temperature in near ear skull region is increased at the level of 0,4 °C degrees. Area of the hot region is expanded by %0,9960 to the FCM data, by % 0,8611 to the EM data.

In light of all the analysis performed, the mobile phone with higher SAR value causes more temperature increase in near ear skull region to the



mobile phone with lower SAR value. 900 MHz causes more temperature increase in near ear skull region to the mobile phone with 1800 MHz. When the Mixed effect was analyzed, using the mobile phone with 900 MHz caused more temperature increase to the mobile phone with 1800 MHz. According to the results obtained by FCM and EM, the results obtained in 4 studies were found to be consistent with each other and close together. The results obtained with these three methods also has been found supporting each other.

**Key Words:** Mixed Effect, Mobile Phone, Thermal Imaging, SAR, Fuzzy C-Means Algorithm, Expectation Maximization Algorithm.

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sırasında yardımını esirgemeyen ve büyük destek sağlayan hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fikret Yalçınkaya'ya, tez çalışmalarım esnasında bana destek olan mesai arkadaşlarım Serdar Emin Sayılır ve Taner Soner'e ve tezimi hazırlamam esnasında büyük fedakârlıklarını gördüğüm eşime ve kızıma teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	x
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xviii
<b>1.GİRİŞ</b> .....	1
<b>2.MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	11
2.1.Elektromanyetik Radyasyonun Temel Özellikleri .....	11
2.1.1.Elektrik Alan .....	12
2.1.2.Manyetik Alan .....	13
2.1.3.Elektromanyetik Spektrum.....	15
2.1.4.Radyo Frekans Alanlar .....	18
2.1.5.Cep Telefonu ve RF Limitleri .....	19
2.1.6.SAR ve Limitleri .....	27
2.2.Termal Görüntülemenin Temelleri .....	32
2.2.1.EM Dalganın Enerji-Frekans İlişkisi .....	34
2.2.2.Kızılötesi Işıma Yasaları .....	34
2.2.3.Atmosferik Geçirgenlik.....	40
2.2.4.Kızılötesi Dedektör Türleri .....	42
2.2.5.Kızılötesi Dedektör Performans Parametreleri .....	47
2.3.Bulanık C-Ortalama Algoritması (FCM-Fuzzy C-Means) ile Görüntü Segmentasyonu.....	49
2.4.Beklenti Maksimizasyonu (Expectation Maximization) Algoritması ile Görüntü segmentasyonu.....	52
<b>3.ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	54
3.1.Bulanık C-Ortalama ve Beklenti Maksimizasyonu ile Elde Edilen Araştırma Bulguları.....	57

3.1.1.900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular .....	59
3.1.2.900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular .....	66
3.1.3.1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular.....	72
3.1.4.900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla kullanımı sonucunda [Mixed Effect] 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular.....	79
3.2.Termal Görüntüleme ile Elde Edilen Araştırma Bulguları.....	84
<b>4.SONUÇLAR.....</b>	<b>89</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>96</b>

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>SAYFA</u>
2.1. Dünya genelinde kullanılan cep telefonu sistemleri [46].....	20
2.2. GSM standartları [48] .....	21
2.3. Genel Halk sağlığı için izin verilen 1 MHz - 300 GHz arası ICNIRP [41] .....	22
2.4. İşçi sağlığı için izin verilen 1 MHz - 300 GHz arası ICNIRP Limitleri [41].....	22
2.5. 1 MHz - 60 GHz arası Türkiye RF limitleri [49].....	23
2.6. Cep telefonunda kullanılan antenlerin avantaj ve dezavantajları.....	27
2.7. Bazı dokuların kütle yoğunluğu, doku iletkenliği, özgül ısı kapasitesi ve k katsayıları [65].....	31
2.8. ABD ve Avrupa'daki SAR limitleri .....	31
2.9. Bazı materyallerin yayıcılık değerleri [69].....	37
3.1. Çalışmada kullanılan cep telefonları ve SAR değerleri [84].....	55
3.2. 1. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi ....	60
3.3. 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	61
3.4. 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	62
3.5. 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	63
3.6. 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	64

3.7.	1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	65
3.8.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi ....	67
3.9.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	68
3.10.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	69
3.11.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	70
3.12.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	71
3.13.	2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	72
3.14.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi ....	73
3.15.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	74
3.16.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	75
3.17.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	76

3.18.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	77
3.19.	3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	78
3.20.	4. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi ....	80
3.21.	4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	81
3.22.	4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 25 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	82
3.23.	4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 35 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	83
3.24.	4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi .....	84
3.25.	900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler .....	86
3.26.	900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler .....	87
3.27.	1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler .....	87
3.28.	900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler .....	88

4.1.	FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri .....	90
4.2.	FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri .....	90
4.3.	FCM ve EM ile elde edilen 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri .....	91
4.4.	FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışma verileri .....	91
4.5.	Termal görüntüleme tekniği ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametrelerin değişimi .....	93



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>SAYFA</u>
1.1. 2006 - 2010 yılları arası yaşlara göre meme kanseri görülme oranı yüzdesi [20].....	3
1.2. Bir kadının meme kanseri tanısı için termal görüntüsü; (a) sol meme, (b) sağ meme [22] .....	4
1.3. M.D. Taurisano ve V. Vorst tarafından yapılan çalışmadaki baş ve bölgeleri [34] .....	6
1.4. a) Konuşma başlangıcı alınan resim b) konuşma sonu alınan resim [36].....	7
1.5. a) Konuşmadan önce b) 0,60 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra c) 1,14 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra d) 0,74 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra alınan resimler [37] .....	8
1.6. a) GSM 900 MHz'de dış anten b) GSM 1800 MHz'de dış anten c) GSM 900 MHz'de iç anten d) GSM 1800 MHz'de iç anten kullanılarak alınan resimler [38].....	9
2.1. EM dalga parametrelerinin gösterimi.....	12
2.2. Elektrik alan çizgileri.....	13
2.3. Sağ el kuralına göre iletkende oluşan manyetik alan .....	14
2.4. EM dalganın E ve M alan bileşenleri .....	15
2.5. Elektromanyetik spektrum [40] .....	17
2.6. Antende yakın alan ve uzak alan.....	19
2.7. a) Dipol anten b) Monopol anten [54] .....	24
2.8. Sarmal (Helix) anten [54].....	24
2.9. Mikroşerit anten [54].....	25
2.10. a) Nokia 6630'a ait PIFA b) Samsung C408'ait PMA [58].....	26
2.11. E ve M alan probu [64] .....	30
2.12. Kızılötesi alt bantları [67] .....	33
2.13. Kirchhoff yasası.....	35
2.14. Kara cismin sıcaklığa bağlı vericiliği [70] .....	38

2.15.	Atmosferik geçirgenlik pencereleri ve bu pencereleri oluşturan dalga boyundaki etkin moleküller [74] .....	41
2.16.	Dedektör türleri.....	43
2.17.	Fotoiletken dedektör ve okuma devresi yapısı .....	44
2.18.	FCM Algoritması Akış Diyagramı .....	51
2.19.	EM Algoritması akış diyagramı.....	53
3.1.	Ortam sıcaklığının ölçümünde kullanılan termometre .....	54
3.2.	Flir SC640 Termal kamera .....	55
3.3.	Çalışma sırasında alınan bir resim .....	56
3.4.	a) RGB b) HSV uzayındaki termal resim .....	57
3.5.	FCM ve EM ile analiz süreci.....	58
3.6.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	60
3.7.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	61
3.8.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	62
3.9.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	63
3.10.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	64
3.11.	1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	65
3.12.	2. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	66
3.13.	2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	67

3.14.	2. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) FCM Algoritma çıktısı resim .....	68
3.15.	2. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	69
3.16.	2. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 40 dakika b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	70
3.17.	2. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	71
3.18.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	73
3.19.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	74
3.20.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	75
3.21.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	76
3.22.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	77
3.23.	3. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	78
3.24.	4. Çalışma	a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	79
3.25.	4. Çalışma	a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	80

3.26.	4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 25 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	81
3.27.	4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 35 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	82
3.28.	4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler.....	83
3.29.	ThermaCAM Researcher Professional 2.10 program arayüzü .....	84
3.30.	a) Termal görüntüleme ile analiz yöntemi b) Piksel sıcaklık değerlerinin bir kısmı .....	85
4.1.	Tüm Çalışmalarda FCM ve EM ile elde edilen veriler.....	89
4.2.	Termal Görüntüle Tekniği ile elde edilen sonuçlar.....	93

## KISALTMALAR DİZİNİ

AMPS	Advanced Mobile Phone System
DCS	Digital Cellular System
EM	Expectation Maximization
EMR	Electromagnetic Radiation
ETACS	European Total Access Communication System
FCM	Fuzzy C-Means
FCC	Federal Communication Commission
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile Communication
HSV	Hue Saturation Value
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRT	Infrared Thermography
LWIR	Long Wavelength Infrared
MTF	Modulation Transfer Function
MWIR	Mid Wavelength Infrared
NEP	Noise Equivalent Power
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference
NIR	Near Infrared
NMT	Nordic Mobile Telephony
PIFA	Planar Inverted-F Antenna
PMA	Planar Monopole antenna
RF	Radio Frequency
RGB	Red Green Blue
SAR	Specific Absorption Rate
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetector

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisiyle çalışan ve cep telefonu örneğinde olduğu gibi elektromanyetik radyasyon yayan cihazların sayısı ve kullanımı, teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin 1995 yılında cep telefonu kullanıcısı ülkemizde 81.276 iken, bugün bu sayı 67.907.092'ye ulaşmıştır [1]. Elektrik enerjisi ile çalışan cihazlar elektromanyetik radyasyon yaymaktadır. Bu nedenle gün geçtikçe elektromanyetik radyasyona (EMR) daha çok maruz kalmaktayız. Cep telefonu haberleşmesini sağlayan Radyo Frekansı (RF), elektromanyetik bir dalgadır. RF dalgaları, atom ve molekülleri iyonlaştıracak düzeyde güçlü değildir. İyonlaştırıcı olmayan bu etkiye maruz kalındığında, ısı ve ısı olmayan etkiler meydana gelir. İnsan dokusu, EMR'yi emmekte ve tutmaktadır. Radyasyona maruz kalma süresinin artması, doku tarafından emilen radyasyonun artması anlamına gelmektedir. EMR'yi emen dokuda sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu sıcaklık artışının incelenmesi EMR'nin insan dokusu üzerinde meydana getirdiği etkiler hakkında önemli bilgiler verecektir. Ayrıca bu bilgi EMR'yi sayısallaştırma, etkisini gözleme ve maruz kalma oranını azaltma açısından çok önemlidir.

Vücudun herhangi bir noktasındaki sıcaklık, termal görüntüleme sistemleriyle görüntülenip analiz edilebilir. Sıcaklık, insan sağlığı açısından hastalıkların tanısında önemli bir parametredir [2,3]. İnsan vücudundaki sıcaklık değişimleri herhangi bir hastalık belirtisi olabilir. Milattan önce 400'den beri bu sıcaklık bilgisi klinik tanımlar için kullanılmıştır [4]. İnsan vücudu sahip olduğu sıcaklığı sürekli sabit tutmaya çalışmaktadır. Bazı özel sebeplerden dolayı vücudun herhangi bir bölgesinde sıcaklık artışı meydana gelebilir [5]. İnsan vücudunu iç yüzey ve dış yüzey (deri) olarak iki bölgeye ayırabiliriz [6]. Dış yüzey sıcaklığı dar bir aralıkta (42-33 °C) değişir. İç yüzeyin sıcaklığı metabolizmanın düzenli çalışabilmesi için sürekli sabit kalmalıdır [7].

Termometre 17. yüzyılda bulunmuştur [4,5]. George Martine termometreyi cisimlerin sıcaklık değişimlerini ölçmek için kullandı [8]. 1868'de Carl Wunderlich herhangi bir hastalıktan dolayı acı çeken insanlarla, hasta olmayan insanların (sağlıklı insanların) vücut sıcaklıklarını karşılaştırarak

inceledi. Sıcaklık artışının bir hastalık göstergesi olduğunu tespit etti [9]. Ayrıca hastalığı olmayan normal bir insanın vücut sıcaklığının 36,3-37,5 °C aralığında olduğu sonucuna ulaştı. İlerleyen yıllarda sıvı termometreler kullanılmaya başlandı [3]. Sir William Herschel 1800'de Kızıl Ötesi radyasyonu keşfetti ve oğlunun termal görüntüsünü kaydetti. Bu tarihte ilk defa yapılan bir şeydi ve sıcaklık ölçümü alanında yeni bir boyut açtı [3]. 1934'de J.D. Hardy insan vücudundan salınan kızılötesi banttaki ışımının fizyolojik rolünü tanımladı ve insan vücudunun kara cisim gibi ışımaya yaptığını söyledi [10,11]. Bu ışımaların termal görüntüleme ile kaydedilebileceği fikri böylece ortaya çıktı. Bu sayede elde edilecek görüntülerin medikal alanda kullanılabileceği düşünüldü. Fakat ilk çalışma 1960 yılında rapor edildi. Çünkü o zamana kadar kızılötesi bantta görüntü alacak kaliteli bir sistem mevcut değildi [7]. Kızılötesi bantta görüntüleme yapan (kızılötesi dedektörler) cihazların ilki II. Dünya Savaşında askeri uygulamalar için geliştirildi [12]. Daha sonra sivil uygulamalarda kullanılmaya başlandı. Kızılötesi görüntüleme (Infrared Termografi-IRT) ile insan vücudundaki sıcaklık dağılımları gözlemlenmiştir [10,13]. 1963'de Barnes yaptığı çalışma ile termal görüntülerin fiziksel anormallikler hakkında bilgi sağlayabileceğini ve fiziksel hastalıkların tanısında kullanılabileceklerini gösterdi [14]. 1996'da Sherman ve arkadaşları vücudun eş uzuvlarının sıcaklık farkını görüntülediler ve insan vücut sıcaklığını taramak için en basit yöntemin termal görüntüleme olduğu sonucuna vardılar [15].

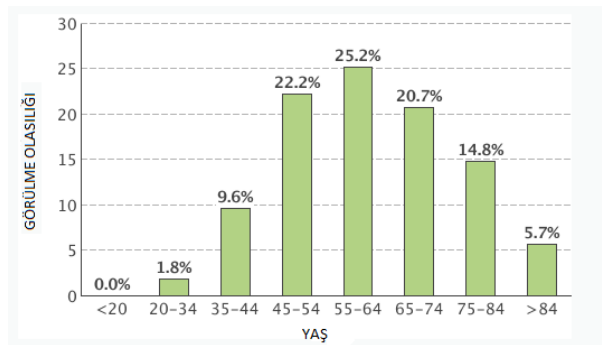
Sıcaklığı 0 K'in üzerinde olan her cisim elektromanyetik radyasyon yayar. Bu radyasyonun elektromanyetik spektrumun hangi bölgesinde algılanacağı cismin sıcaklığına bağlıdır. Kızılötesi görüntüleme sistemleri cisimlerin yaptığı ışımayı kızılötesi bantta görüntüleyebilme yeteneğine sahiptirler [5,16,17]. Kızılötesi bant dalga boyuna göre 3 kısma ayrılır. Birincisi yakın kızılötesi bant (NIR), 0,76-1,5 µm aralığındadır. İkincisi Orta kızılötesi bant (MIR), 1,5-5,6 µm aralığındadır. Üçüncüsü uzak kızılötesi bant (FIR), 5,6-1000 µm aralığındadır. Her bir bant aralığında çalışan, farklı sıcaklığa sahip nesnelere görüntülemek için kullanılan farklı sistemler bulunmaktadır [17]. Termal görüntülemenin medikal alandaki uygulamalarından bazıları şöyle verilebilir.

## i. Isıl Denge Görüntüleme

Egzersiz sırasında vücutta ısı açığa çıkar. Açığa çıkan ısının sebebi, vücudun enerji tüketiminin artmasından dolayı bu eksilen enerji ihtiyacını karşılamak için hücrelerde enerji üretiminden dolayı açığa çıkan ısı miktarındaki artıştır. Bu ısı, kan damarlarından kan ile deri yardımıyla vücut dışına atılır. Buna ısıl denge denir. Dinamik deri yüzeyi sıcaklık dağılımı, birçok faktör tarafından kontrol edilir. Bunlardan bazıları; yüzey katmanındaki kan akışı, daha derindeki kan damarlarıyla olan ısı alışverişi ve derideki terin buharlaşmasıdır [18]. Y.V. Gulyaev ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada egzersiz yapan bir insanın el, ayak ve yüz bölgelerini termal görüntüleme ile görüntülediler. Bu bölgelerde sıcaklık artışı meydana geldiğini ve bu sıcaklığın ter yolu ile atıldığını gözlemlediler. Ayrıca bu çalışma ile ter bezlerinin yüzeyde asimetrik bir şekilde bulunduğunu gördüler [18].

## ii. Meme Kanseri Tespiti

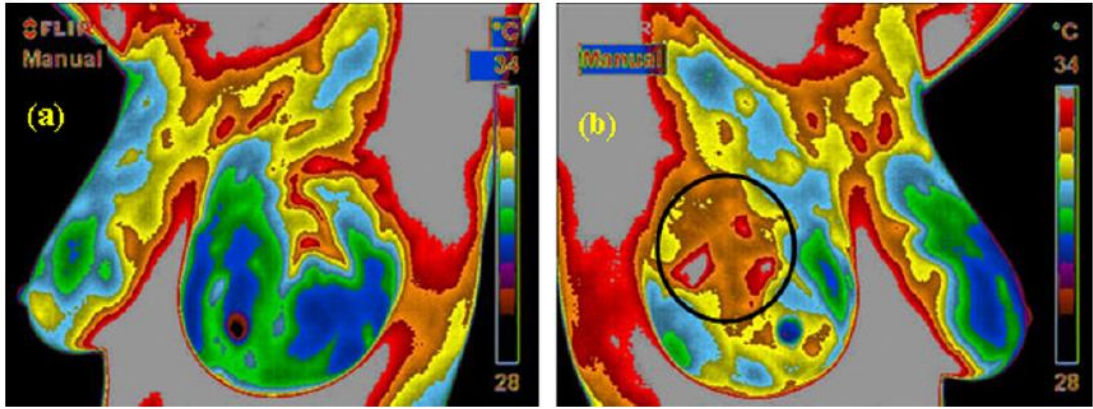
Meme kanseri daha çok kadınlarda görülür ve görülme oranı % 30'dur [19]. 2006-2010 yılları arasında meme kanserinden ölen kadınların yaş ortalaması 68'dir. Meme kanserine yakalanma oranları yaşlara göre Şekil1.1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.1.** 2006-2010 yılları arası yaşlara göre meme kanseri görülme oranı yüzdesi [20]



Meme kanseri en çok 55-64 yaşları arasında görülmektedir. Ortalama görülme yaşı ise 61'dir [20]. Meme kanserini tespit etmenin farklı yolları mevcuttur. Örneğin Mamografi, ultrason ve biyopsi gibi. Mamografi en popüler olanıdır. Ancak Mamografi çok maliyetlidir ve hasta X ışınlarına maruz kalır. Termal görüntülemenin ucuz olma, zararlı ışınlara maruz bırakmama, aktif sinyal göndermeme, temas gerektirmeme, daha fazla bilgi üretme vb. gibi sebeplerden dolayı mamografiye göre daha avantajlıdır. D. Kennedy ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada [21] termal görüntüleme ile diğer görüntüleme sistemleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak termal görüntüleme sistemlerinin daha fazla bilgi ürettiği görülmüştür [21]. E.Y.K. Ng bir çalışmada mamogram kullanarak bir kadının sağ göğsünde kanser olmadığını belirledi. Ancak kadının sağ ve sol memesi termal görüntüleme ile görüntülendiğinde, sağ memede bir tümör tespiti yapıldı. Kadının sağ ve sol memesine ait termal görüntü Şekil1.2'de verilmiştir. Yapılan biyopsi ile kadının sağ memesindeki tümörün varlığı doğrulanmıştır [22].



**Şekil 1.2.**Bir kadının meme kanseri tanısı için termal görüntüsü; (a) sol meme, (b) sağ meme [22]

### **iii. Ateş Taraması**

Termal görüntüleme yöntemi ile vücudun sıcaklık haritası çıkarılabilir ve ateş taraması yapılabilir. Nguyen ve arkadaşları, yüz ve boyun bölgesi ısı taramasını termal görüntüleme ile yapmışlardır [23]. Özel bir durum olarak 2009 yılında Japonya'da Narita Hava Alanı'nda H<sub>1</sub>N<sub>1</sub> virüsünün sebep olduğu hastalığa yakalananları tespit etmek için termal görüntüleme sistemi kullanılmıştır [24].

### **iv. Deri Hastalıklarının Tanısında**

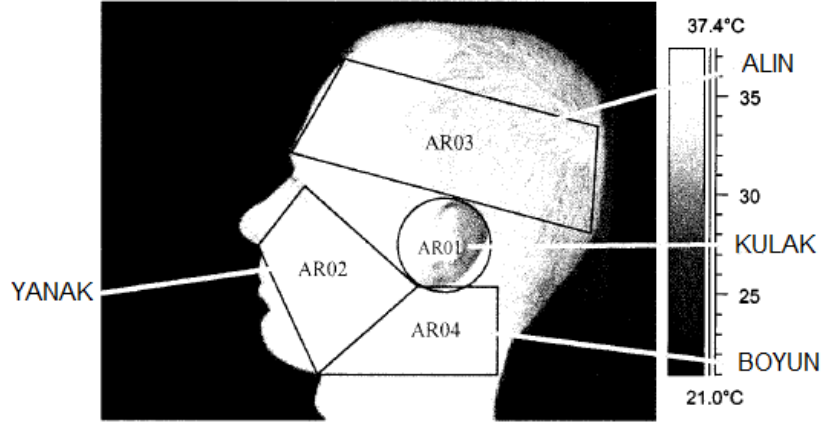
Deri hastalıklarında genellikle iltihaplı bölgeler üzerinde normal olmayan ısı dağılımları görülür. Vargan ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada 20 yıllık Hepatit-B hastası 50 yaşındaki bir insanda cüzzam tespiti için 587 gün boyunca termal görüntüleme yapmak zorunda kaldılar. 87. günde cüzzam tespit edildi. Hâlbuki deride renk bozukluğu 182 gün sonra meydana gelmişti [25].

Termal görüntülemeye farklı alanlardan örnekler de verilebilir: Diş hastalıklarının tanısı [26,27], dermatolojik uygulamalar [25], kan basıncı ölçümü [28], romatizmal hastalıkların tanısı [29], karaciğer hastalıklarının tanısı [30,31], böbrek tedavisi [32], kalp operasyonları [33] vb. uygulamalar bulunmaktadır.

### **v. Cep telefonunun Etkisini İncelemede**

Cep telefonundan yayılan elektromanyetik radyasyonun insan kulak ve etrafında oluşturduğu etki, termal görüntüleme sistemleri ile görüntülenip analiz edilebilmektedir. Bu yöntem, pasif ve çok etkili bir yöntemdir. Çünkü herhangi bir aktif sinyal gönderimi yapılmadan veya herhangi bir temas olmadan kolay uygulanabilen bir yöntemdir. İnsan vücudunun kızılötesi bantta yaptığı ışımaya, termal görüntüleme sistemleri ile alınarak analiz edilmektedir. Literatürde bu yöntemle yapılan çalışmalar bulunmaktadır [34-38].

Cep telefonunun insan vücuduna yaptığı etkiyi analiz etmek için termal görüntülemenin kullanıldığı ilk çalışma, 2000 yılında M.D. Taurisano ve V. Vorst tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 900 MHz'de çalışan A,B ve C model cep telefonları kullanılmıştır. Şekil 1.3'de gösterildiği gibi, insan baş bölgesinin bazı bölümlerinde cep telefonu maruziyetinden kaynaklanan etkiler incelenmiştir.

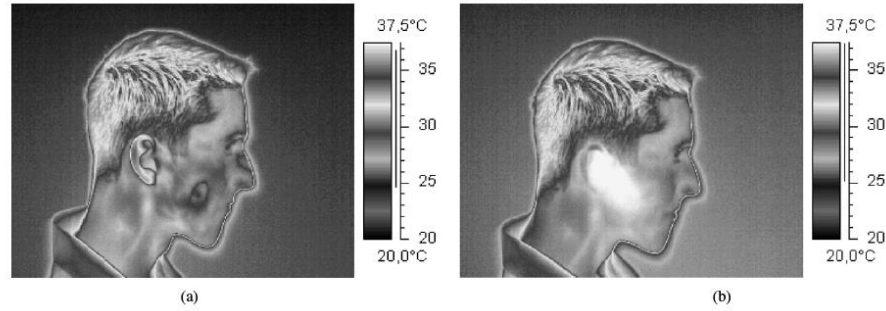


**Şekil 1.3.** M.D. Taurisano ve V. Vorst tarafından yapılan çalışmadaki baş ve bölgeleri [34]

Bu çalışmada baş bölgesi yanak, boyun, kulak ve alın olmak üzere dört alana bölünmüştür. 10 kişilik deney gurubu 20 dakika konuşmuştur. Konuşma termal kamera ile görüntülenmiş ve görüntüler analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda kulak ve etrafında 20 dakikalık konuşma sonunda; A model cep telefonu ortalama 1,1 °C, B model cep telefonu 1,8 °C, C model cep telefonu 1,5 °C sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür. Yanak, alın ve boyun bölgesindeki sıcaklıklarda ise önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir [34].

2003 yılında D.S. Yoo tarafından yapılan bir çalışmada, 1,8 GHz frekansta çalışan cep telefonu ile yapılan konuşma IRIS-500 termal kamera ile görüntülenmiştir. 20 dakika konuşmadan sonra kulak ve etrafında meydana gelen sıcaklık artışının 1,11 °C olduğu görülmüştür. Kullanılan cep telefonu modeli ve SAR değeri ile ilgili bilgi bulunmamaktadır [35].

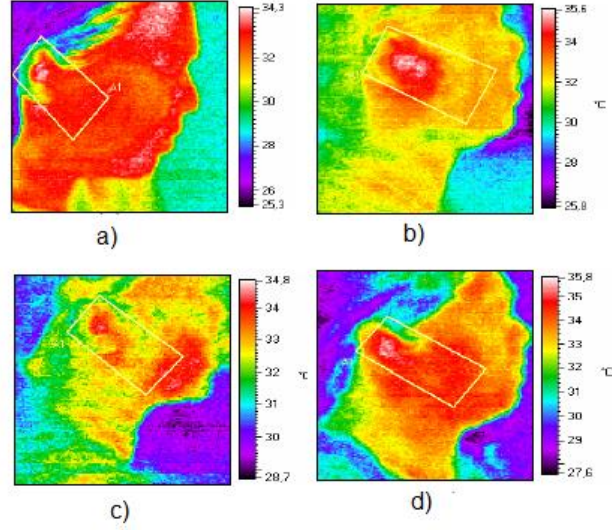
2005 yılında C. Kargel tarafından yapılan bir çalışmada, 2 farklı SAR değerine sahip 2 cep telefonu GSM 1800'de kullanılmış ve ThermaCAM S60 Flir termal kamera ile görüntülenmiştir. Kullanılan cep telefonlarının SAR değerleri, 0,39 W/kg ve 1,26 W/kg'dır. 4 kişi tarafından 35 dakikalık konuşma yapılmıştır. 35 dakikalık konuşma sonucunda termal kamera ile alınan görüntü Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 1.4.** a) Konuşma başlangıcı alınan resim b) konuşma sonu alınan resim [36]

35 dakikalık konuşma sonucunda, 0,39 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun kulak ve etrafında meydana getirdiği sıcaklık artışı, 0,7 °C olarak; SAR değeri 1,26 W/kg olan cep telefonunun meydana getirdiği sıcaklık artışının ise 2,3 °C olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile aynı frekansta çalışan iki farklı SAR değerine sahip cep telefonunun etkisi karşılaştırılmış ve SAR değeri yüksek olan cep telefonunun daha fazla sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür [36].

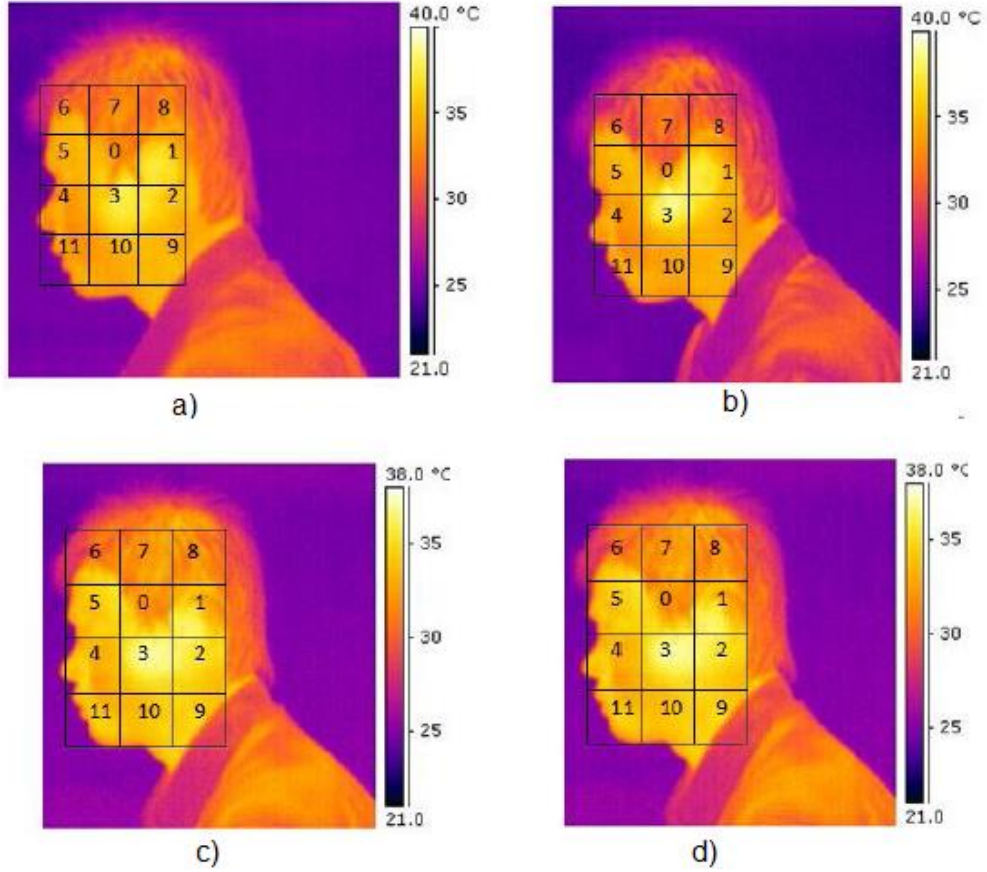
2008 yılında Rusnani A. ve Norsuzila N. tarafından yapılan bir çalışmada, 0,6 W/kg, 0,74 W/kg, 1,14 W/kg SAR değerlerine sahip 3 farklı cep telefonu ile 30 dakika konuşma yapılmıştır. Konuşmadan önce ve sonra alınan resimler Şekil 1.5'te gösterilmiştir [37].



**Şekil 1.5.** a)Konuşmadan önce b) 0,60 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra c) 1,14 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra d) 0,74 W/kg SAR değerli cep telefonu ile konuşmadan sonra alınan resimler[37]

Yapılan konuşmalar termal kamera ile görüntülenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen resimler analiz edilmiştir. 30 dakikalık konuşma sonunda 0,6 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu maksimum 3,5 °C sıcaklık artışına, 0,74 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu maksimum 1,2 °C sıcaklık artışına, 1,14 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu maksimum 4,1 °C sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür [37].

2010 yılında D.A.A.MAT ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada GSM 900 MHz ve GSM 1800 MHz servislerde, iç ve dış anten içeren cep telefonları ile konuşma yapılmış, yapılan konuşma termal kamera ile 5 dakikada bir resim alınarak görüntülenmiştir. Yapılan çalışma sonunda alınan resimler Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 1.6.** a) GSM 900 MHz'de dış anten b) GSM 1800 MHz'de dış anten c) GSM 900 MHz'de iç anten d) GSM 1800 MHz'de iç anten kullanılarak alınan resimler [38]

Çalışma sırasında cep telefonu ile 45 dakika konuşulmuştur. Çalışmanın 20. dakikasında en çok sıcaklık artışına GSM 900 MHz'de dış anten kullanımının sebep olduğu görülmüştür. Meydana gelen sıcaklık artışı ise 3,5 °C olarak ölçülmüştür. Çalışma sonucunda GSM 1800 MHz dış antenli telefon 3 °C sıcaklık artışına, GSM 900 MHz dış antenli telefon 2 °C sıcaklık artışına, GSM 900 MHz iç antenli telefon 2,1 °C sıcaklık artışına, GSM 1800 MHz iç antenli telefon 1,2 °C sıcaklık artışına sebep olduğu görülmüştür. Sonuç olarak dış anten ve 900 MHz frekans kullanan cep telefonları insan dokusunda daha fazla radyasyon emilimine sebep olduğu görülmüştür [38].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere cep telefonunun kullanımı ile kulak ve etrafında oluşan termal etkinin termal görüntüleme tekniği ile alınan resimlerinin analizi sadece termal kameranın gösterdiği

sıcaklığın değerlendirmesi ile yapılmıştır. Bu tezde 2 farklı SAR değerine sahip cep telefonu GSM 900 MHz ve DCT 1800 MHz'de kullanılmış, konuşma 50 dakika boyunca termal kamera ile görüntülenmiş, alınan görüntüler termal görüntüleme, Bulanık C-Ortalama (FCM-Fuzzy C-Means) ve Beklenti Maksimizasyonu (EM-Expectation Maximization) ile görüntü bölütleme yapılarak, elde edilen veriler analiz edilmiştir. Termal görüntüleme, FCM ve EM ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak cep telefonunun insan kulak ve etrafında sebep olduğu sıcaklık artışı dolayısıyla insan dokusunun maruz kaldığı elektromanyetik dalganın etkisi analiz edilmiş ve sayısallaştırılmıştır. Cep telefonunda kullanılan servis frekansının, cep telefonu SAR değerinin, her iki servis frekansının sıra ile kullanımı ile oluşan karma etkinin (mixed effect) analizi yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Elektromanyetik Radyasyonun Temel Özellikleri

Elektromanyetik radyasyon (EMR) veya elektromanyetik (EM) dalga, elektrik (E) ve manyetik (M) alan bileşenlerinden oluşan, boşlukta (uzayda), atmosferde veya maddesel bir ortamda ilerleyebilen, belirli bir enerjiye sahip, dalga boyu veya frekansa bağlı olarak hareket eden sinyallerin genel adıdır. EM alanlar, değişken ve durgun olarak iki gruba ayrılır. Durgun alanlar zaman içerisinde değişmezken (zamandan bağımsız), değişken alanlar zamanın bir fonksiyonu olarak değişirler. EM alanı oluşturan E ve M alan bileşenlerinden, yüklerin durgun olması durumunda sadece bir tanesi oluşabilir. Yani durgun E alan oluşması için durgun M alanın oluşmasına ihtiyaç yoktur. Aynı şekilde durgun M alan oluşması için durgun E alanın oluşmasına ihtiyaç yoktur. Ancak değişken bir E veya M alan oluşması diğer alanın oluşmasına sebep olur. Suyun içerisine bir cisim atıldığında meydana gelen olay bu durumu örneklemektedir. Suyu bıraktıran cisim bırakıldığı noktada bir değişiklik meydana getirir. Bu değişiklik cismin düştüğü noktada kalmaz çevresine doğru ilerler. Aynı şekilde bir noktada meydana gelen manyetik alandaki değişim diğer noktalarda elektrik alan oluşmasına sebep olur.

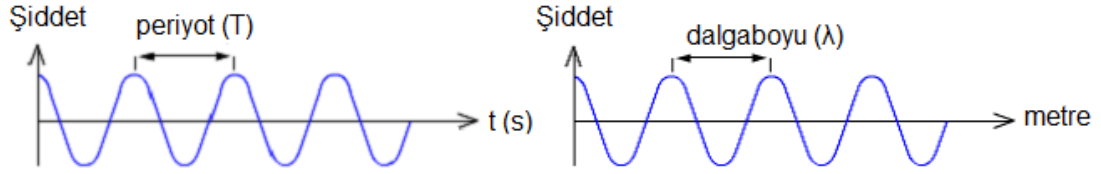
EM dalgalar, zamanla kendini tekrar eden sinyallerdir. Kendini tekrar etme süresine Periyot (T) denir ve birimi saniyedir. Birim zamanda oluşan toplam sinyal sayısına ise frekans (f) denir ve birimi Hz (s<sup>-1</sup>)'dir. Sinyalin bir çevriminin uzunluğu dalga boyu (λ) olarak adlandırılır ve birimi m'dir. Frekans ile periyot arasında ilişki eşitlik 2.1'de verilmiştir.

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Uzayda EM dalgalar, frekans veya periyotlarından bağımsız olarak aynı hızla ilerler. Güneş ışığı da bir EM dalgadır. Bu yüzden tüm EM dalgalar ışık hızıyla ilerler. Işık hızı c ile sembolize edilir ve yaklaşık olarak değeri eşitlik 2.2'de verilmiştir.



$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (2.2)$$



**Şekil 2.1.** EM dalga parametrelerinin gösterimi

Şekil 2.1’de EM dalga gösterilmiştir. EM dalgalar, ışık hızı ile hareket ederler ve sıcaklık, basınç, nem gibi atmosferik koşullardan etkilenirler. Bu etki ihmal edilebilecek düzeydedir. EM dalga parametrelerinden olan frekans ve dalga boyunun çarpımı sabittir ve ışık hızına eşittir.

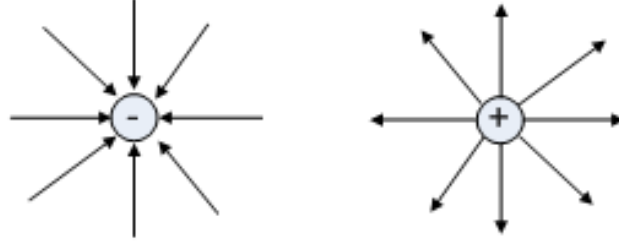
### 2.1.1. Elektrik Alan

Elektromanyetik dalganın bir bileşeni olan E alan, elektriksel yükler tarafından oluşturulur. İki tür elektriksel yük bulunmaktadır. Bunlar negatif ve pozitif elektrik yükleridir. Aynı işaretli yükler birbirini iterken, zıt işaretli yükler birbirini çekme refleksi gösterirler. Yani yükler karşılıklı olarak birbirlerine kuvvet uygular. Bu kuvvet yüklerin işaretine bağlı olarak itme veya çekme kuvveti olarak ikiye ayrılır. Yükler herhangi bir temas olmadan bu kuvveti uygularlar. E alan bir yükün 1C (Coulomb) değerine sahip bir yüke uyguladığı kuvvettir. Birimi V/m’dir. E alan formülü eşitlik 2.3’te gösterilmiştir.

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \left( \frac{V}{m} \right) \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3’teki q, E alanı oluşturan elektriksel yükün değeridir.  $\epsilon$  yükün bulunduğu ortamın dielektrik katsayısıdır. r ise elektrik alan değeri hesaplanacak noktanın yüke olan uzaklığıdır. E alan, vektörel bir büyüklüktür.

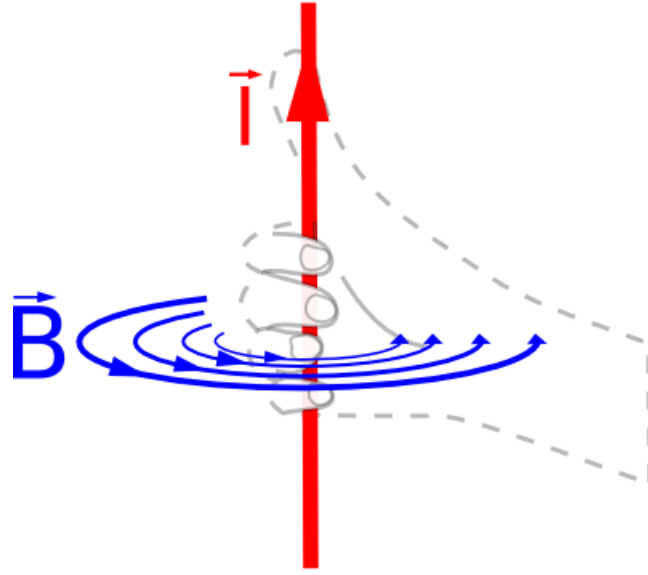
Yön ve şiddet bilgisi içerir. E alanın yönü, yükün işaretine bağlı olarak değişir. Yük pozitif ise elektrik alanın yönü yükten dışarıya doğrudur. Yük negatif ise E alan yönü yüke doğrudur. Şekil 2.2'de yükün işaretine bağlı olarak E alan yönü gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Elektrik alan çizgileri

### 2.1.2. Manyetik Alan

Manyetik alanlar, hareketli yükler tarafından oluşturulur ve B sembolü ile gösterilir. E alan gibi vektörel bir büyüklüktür. Birimi Tesla (T) veya Gauss (G)'tur ( $1G=10^{-4}$  T). Yüklerin hareketi elektrik akımını oluşturur. Faraday, manyetik alan ile M alana maruz kalan maddeler arasında bir etkileşim olduğunu bulmuştur. Bu ilkeye göre, akım akan bir iletken etrafında manyetik alan oluşur. Ayrıca M alana maruz kalan iletkende akım akmaya başlar. Şekil 2.3'te akım akan iletkende meydana gelen M alan gösterilmiştir.



**Şekil 2.3.** Sağ el kuralına göre iletkende oluşan manyetik alan

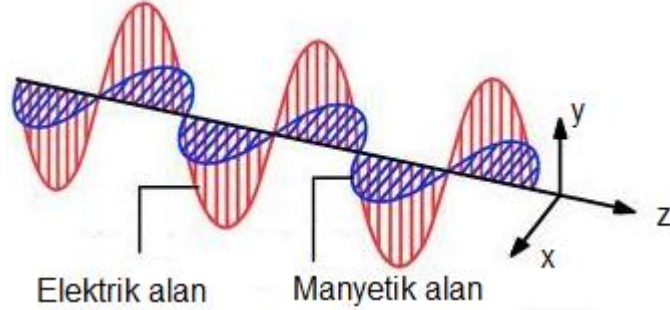
Şekil 2.3'teki baş parmak iletkenin akım yönünü, diğer parmaklar ise oluşan M alanının yönünü göstermektedir.

Malzemeler, M alanına verdikleri tepkiye göre üç sınıfa ayrılır: Diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik maddeler. Diyamanyetik maddeler M alanından az etkilenen, bağıl manyetik geçirgenlikleri ( $\mu_r$ ) 1'den küçük olan altın, gümüş, su ve bakır gibi maddelerdir. Paramanyetik maddeler bağıl manyetik geçirgenlikleri 1'den büyük olan M alanına paralel yönlenecek hava ve silisyum gibi maddelerdir. Ferromanyetik maddeler ise kuvvetli bir şekilde M alanından etkilenen nikel, demir ve kobalt gibi maddelerdir. M alan formülü eşitlik 2.4'te gösterilmiştir.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot q \cdot v \cdot \sin \theta}{4\pi r^2} \quad [ \text{T veya G} ] \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4'deki formüle göre q yükü v hızı ile manyetik geçirgenliği  $\mu_0$  ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m) olan boşlukta hareket etmektedir. İletkenden r kadar uzakta ve hız vektörü ile  $\theta$  kadar açı yapan bir noktadaki M alan değeri B'dir.

Sonuç olarak EM dalga E ve M alan bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler birbirine dik açı ile hareket etmektedir. Şekil 2.4'te E ve M alan bileşenlerinin hareketi gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** EM dalganın E ve M alan bileşenleri

Şekil 2.4'e göre EM dalga z yönünde ilerlemektedir. E ve M alan bileşenleri ise birbirine dik olarak hareket etmektedir.

### 2.1.3. Elektromanyetik Spektrum

EM spektrum evrende bilinen tüm EM dalgaların enerji, dalga boyu veya frekansa bağlı olarak sınıflandırılması ile oluşmuş çizelgedir. EM spektrumda artan dalga boyuna göre gama ( $\gamma$ ) ışını, X ışını, mor ötesi (UV), görünür ışık (VL), kızılötesi radyasyon (IR), mikrodalga (MW), radyo frekans (RF) olarak sıralanır. EM spektrumdaki EM dalgaların hızları aynı olmasına rağmen enerji, frekans ve dalga boyları farklılık göstermektedir. EM dalganın enerji formülü eşitlik 2.5'te gösterilmiştir.

$$E = h \cdot f (\text{joule}) = \frac{h \cdot c}{\lambda} (\text{joule}) \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'teki h Planck sabiti ( $6,626 \times 10^{-34}$  j.s)'dir. EM dalganın enerjisi ve frekansı doğru orantılıdır. Dalgaboyu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla en büyük enerjili bant gama ve X ışınları, en düşük enerjili bant ise RF ve oldukça düşük frekanstır (ELF-Extremely Low Frequency). Enerjilerine göre

EM dalgalar, iyonlaştıran ve iyonlaştırmayan EM dalga olarak iki kısma ayrılır. İyonlaşma, atomdan elektron koparılması anlamına gelmektedir. Elektron enerji ile atomdan koparılır. Frekansı en yüksek dolayısıyla enerjisi en yüksek olan gama ve X ışınları ile düşük frekanslı UV, VL ve IR'ın bir kısmı iyonlaştırıcı radyasyondur. Bunun yanında enerjisi düşük olan IR'ın bir bölümü, mikrodalga, RF dalgaları ve çok düşük frekans iyonlaştırmayan radyasyondur. İyonlaştıran radyasyon kanser yapıcı olarak bilinir. İyonlaştırıcı radyasyona maruz kalan bir atomun son yörüngesindeki elektronlar kopar ve iyon oluşur. Bu olay kimyasaldır. Bir elektronun kopması için 1 eV enerji uygulanması gerekir [39].

RF ve mikrodalga, iyonlaştırmayan radyasyona örnektir. RF dalgaların frekans ve enerji aralığı şu şekildedir;

$$3 \times 10^3 \leq f \leq 1 \times 10^9 \text{ (Hz)}$$

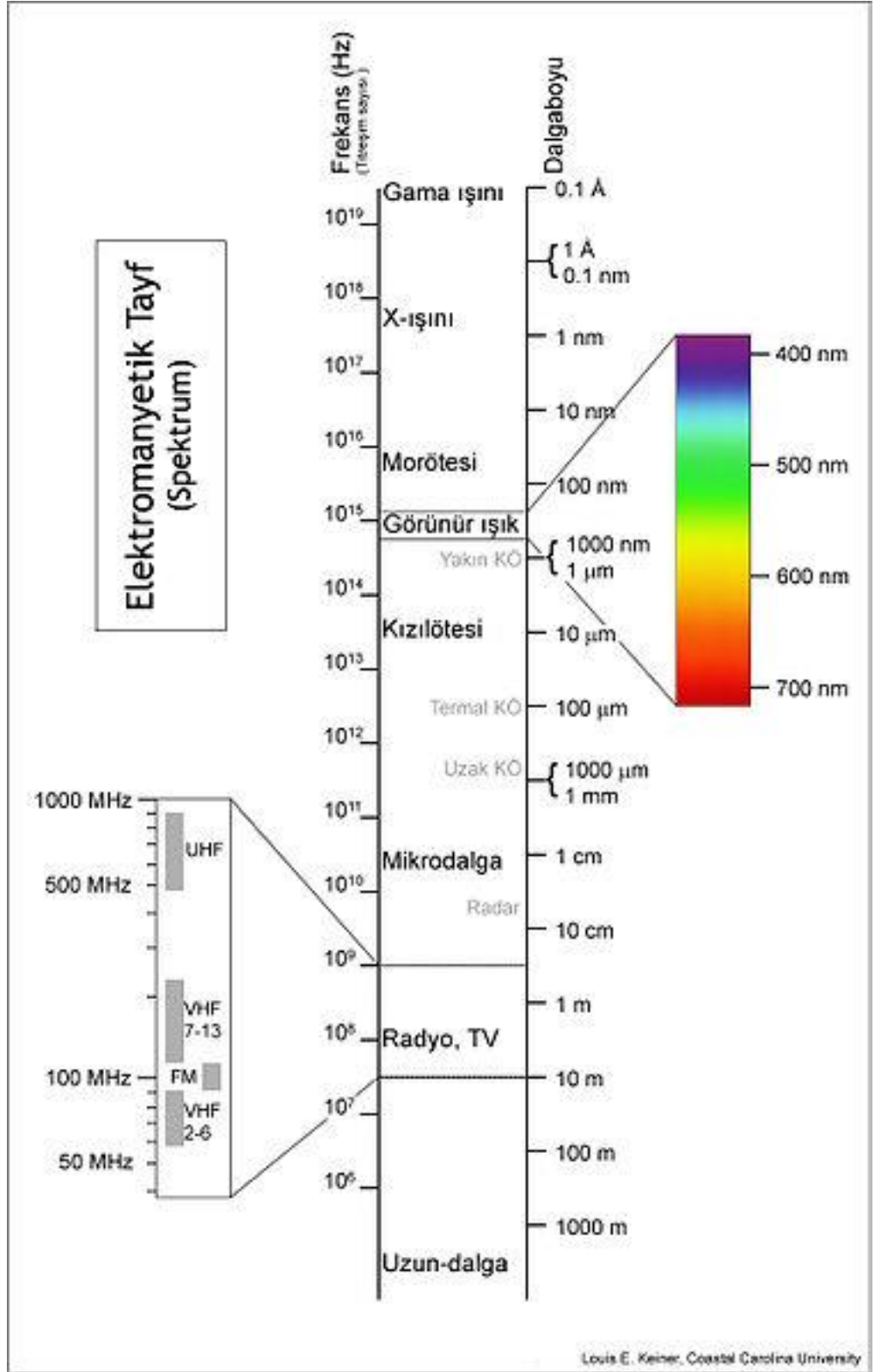
$$1,2 \times 10^{-11} \leq f \leq 4 \times 10^{-6} \text{ (eV)}$$

Mikrodalga için frekans ve enerji aralığı şu şekildedir;

$$10^9 \leq f \leq 10^{12} \text{ (Hz)}$$

$$4 \times 10^{-6} \leq f \leq 4 \times 10^{-3} \text{ (eV)}$$

EM spektrum Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.5.** Elektromanyetik spektrum [40]

#### 2.1.4. Radyo Frekans Alanlar

Radyo frekans alanlar, günlük hayatımızın birçok yerinde kullanılmaktadır. Cep telefonu, mikrodalga fırın, telsiz telefon, TV, radyo vericileri, baz istasyonları, MRI cihazları, radarlar, telsiz gibi birçok uygulaması bulunmaktadır. Aslında RF alanlar bütün hayatı çevrelemiştir.

RF dalgaları, EM spektrumun frekans olarak 3 KHz – 300 GHz ve dalga boyu olarak 100 m – 1 mm aralığındaki alandır ayrıcaiyonlaştırmayan radyasyondur [41-43]. RF dalgaları antenden yayılır ve ışık hızı ile ilerler. Kaynaktan (antenden) uzaklaştıkça düzlem dalga özelliği gösterirler. Birim alandan birim zamanda akan güç miktarına güç yoğunluğu denir ve  $S$  ( $W/m^2$ ) ile gösterilir. Güç yoğunluğu, EM dalganın, E ve M alan bileşenlerinin vektörel çarpımına karşılık gelir. E alan ve M alan  $1/r$  ile değişirken, güç yoğunluğu  $1/r^2$  ile değişir.  $r$  kaynaktan uzaklığı ifade eder. Aynı düzlemde ilerleyen E alan, M alan ve bu ikisinin vektörel çarpımı olan  $z$  yönündeki dalganın ilerleme vektörü birbirine diktir. RF dalganın ilerlediği boşluk empedansı ( $Z=E/H$ )  $377 \Omega$ 'dur [44,45].

Kaynak (anten) etrafında kaynağı çevreleyen 3 bölge meydana gelir. Bu bölgeler kaynağa yakınlığa göre reaktif yakın alan, ışık alan (Fresnel) ve uzak alan bölgesidir. Antene en yakın olan reaktif alan bölgesinin genişliği eşitlik 2.6'da ifade edilmiştir.

$$R_1 = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} (m) \quad (2.6)$$

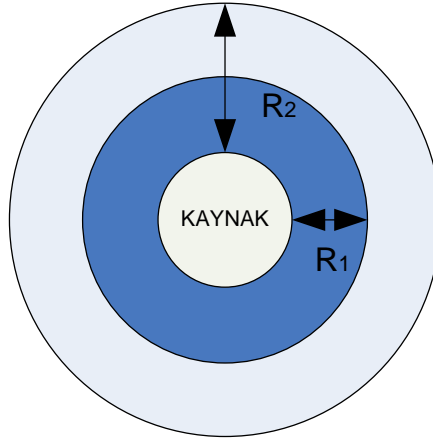
$D$  antenin en uzun dipolüdür. Reaktif yakın alan bölgesi kaynaktan uzaklaştıkça çok hızlı bir şekilde azalır. Genellikle bu bölgeye RF dalga yayan cihazlar için çalışan kişiler maruz kalır [42,44].

Fresnel bölgesi yakın alan ile uzak alan arasında bulunmaktadır. Eğer anten dalga boyunun altında maksimum dizi içerirse bu bölge oluşmayabilir. Bu bölgenin kaynağa olan maksimum mesafesi eşitlik 2.7'de ifade edilmiştir.

$$R_2 = \frac{2 \cdot D^2}{\lambda} (m) \quad (2.7)$$

Yani Fresnel bölgesi, eşitlik 2.6 ile eşitlik 2.7 arasında kalan bölgedir [42,44].

Uzak alan bölgesi Fresnel bölgesinin bittiği yerden ( $R_2$ ) başlar. Bu bölgede antenin açısal dağılımı mesafeden bağımsızdır. Şekil 2.6'da reaktif yakın alan, Fresnel bölgesi ve uzak alan gösterilmiştir.



**Şekil 2.6.** Antende yakın alan ve uzak alan

Dünya atmosferi zararlı doğal RF dalgalarından dünyayı korumaktadır. Ancak 10 MHz- 37,5 GHz aralığı atmosferden geçebilmektedir. Yapay manyetik alanlar hayatımızın her yerine girmiştir. Örneğin cep telefonu (20 MHz- 2 GHz için) 2,5 W çıkış gücünde kaynaktan 10 cm uzaklıkta 145 V/m, 60 cm uzaklıkta 24,2 V/m değerinde E alan oluşturur [46].

### 2.1.5. Cep Telefonu ve RF Limitleri

Cep telefonu, ses ve veri alışverişi yapmak için kullanılan bir cihazdır ve elektromanyetik spektrumun RF bölgesini kullanır. Cep telefonu haberleşmesi, baz istasyonları vasıtası ile gerçekleşir. Haberleşme yapılacak alan hücre olarak adlandırılan arı peteğine benzer bir şekilde altıgen yapıya sahip bölgelere ayrılmıştır. Her hücreye belirli frekanslar tahsis edilmiştir. Cep



telefonu baz istasyonu ile bağlantı kurmak için yüksek şiddette sinyal gönderir. Baz istasyonu ile bağlantı kurulduktan sonra haberleşmede kullanılan enerji minimum seviyeye düşmektedir.

Kullanılan ilk cep telefonu sistemleri ABD’de AMPS (Advanced Mobile Phone System), Avrupa’da NMT (Nordic Mobile Telephone) ve ETACS (European Total Access Communication System) analog teknolojiyi kullandılar. Bu sistemlerde her telefon farklı frekansı kullanır. Sürekli sinyal gönderir [41]. Günümüzde sayısal sistemler kullanılmaktadır. Bunlar; GSM (Global System for Mobile Communication), D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone System), PDC (Personel Digital Cellular) ve DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications)’dir. Günümüzde kullanılan cep telefonu sistemleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir [46].

**Çizelge 2.1.** Dünya genelinde kullanılan cep telefonu sistemleri [46]

<b>SİSTEM</b>	<b>KULLANAN ÜLKE</b>	<b>TİPİ</b>	<b>FREANKSI</b>	<b>MAKSİMUM ÇIKIŞ GÜCÜ</b>
NMT	İskandinavya	Analog	900 MHz	1 W
AMPS	ABD, Asya	Analog	800 MHz	0,6 W
D-AMPS	ABD, Asya	Sayısal	800/900 MHz	0,2 W
ETACS	İngiltere, Asya	Analog	900 MHz	0,6 W
GSM	Avrupa, Asya, Avusturya	Sayısal	900 MHz 1800 MHz	0,25 W 0,125 W
DECT	Avrupa, Asya	Sayısal	1900 MHz	0,01 W
PDC	Japonya	Sayısal	800/1500 MHz	0,2 W

GSM haberleşme sisteminde genel olarak 4 farklı iletişim protokolü kullanılır. Bunlar; 900 MHz, 1800 MHz, 850 MHz ve 1900 MHz’dir. Çoğunlukla GSM900 (Global System for Mobile Communication 900-Mobil İletişim için Küresel Sistem 900) ve GSM1800 ( Global System for Mobile

Communication 1800-Mobil İletişim için Küresel Sistem 1800) iletişim protokolleri kullanılır [47]. GSM1800 sistemi, GSM900 sistemine göre daha fazla bant genişliği sağlar. Ancak daha az çıkış gücüne sahiptir. GSM standartlar ve limitleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Türkiye'de GSM900 ve DCS1800 (Digital Cellular System 1800-Sayısal Hücresel Sistem 1800) iletişim protokolleri kullanılmaktadır [48].

**Çizelge 2.2.** GSM standartları [48]

	<b>GSM900</b>	<b>GSM1800</b>
<b>Frekans Bandı</b>	890-915 MHz 935-960 MHz	1710-1785 MHz 1805-1880 MHz
<b>Kanal Aralığı</b>	200 KHz	200 KHz
<b>Modülasyon</b>	GMSK	GMSK
<b>Maksimum Çıkış Gücü</b>	2 W	1 W
<b>Baz İstasyonu Çıkış Gücü</b>	320 W	20 W
<b>Maksimum Mesafe</b>	35 km	8 km
<b>Modülasyon Hızı</b>	270 kbps	270 kbps
<b>Kanal Kapasitesi</b>	124 Kanal	374 Kanal

RF uygulamaları ile ilgili uluslararası ve ulusal standartlar bulunmaktadır. Bu limitler Avrupa'da ICNIRP, ABD'de FCC ve IEEE tarafından düzenlenmektedir. Genel Halk sağlığı için izin verilen 1 MHz- 300 GHz arası ICNIRP Limitleri Çizelge 2.3'te, işçi sağlığı ile ilgili ICNIRP Limitleri Çizelge 2.4'te sunulmuştur [41].

**Çizelge 2.3.** Genel Halk sağlığı için izin verilen 1 MHz - 300 GHz arası ICNIRP Limitleri [41]

FREKANS	E ALAN (V/m)	M ALAN (A/m)	GÜÇ YOĞUNLUĞU (V/m <sup>2</sup> )
1 MHz-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	-
10 MHz-400 MHz	28	0,073	2
400 MHz-2 GHz	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$f/200$
2GHz-300GHz	61	0,16	10

**Çizelge2.4.** İşçi sağlığı için izin verilen 1 MHz - 300 GHz arası ICNIRP Limitleri [41]

FREKANS	E ALAN (V/m)	M ALAN (A/m)	GÜÇ YOĞUNLUĞU (V/m <sup>2</sup> )
1 MHz-10 MHz	$610/f$	$1,6/f$	-
10 MHz-400 MHz	61	0,16	10
400 MHz-2 GHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$f/40$
2GHz-300GHz	137	0,36	50

Türkiye’de RF limitlerini Telekomünikasyon Kurumu (TK) belirler. 09.09.2001 tarih ve 24518 Sayılı Resmi Gazete’de **“10 kHz - 60 GHz Frekans Bandında Çalışan Sabit Telekomünikasyon Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddeti Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Ölçüm Yöntemleri ve Denetlenmesi Hakkında Yönetmeliğin Uygulanmasına ilişkin Tebliğ”** yayınlanmıştır. Telekomünikasyon Kurumu’nun yayınladığı 1 MHz-60 GHz arası Türkiye RF limitleri Çizelge 2.5’te sunulmuştur [49].

**Çizelge 2.5.** 1 MHz - 60 GHz arası Türkiye RF limitleri [49]

FREKANS	E ALAN (V/m)		M ALAN (A/m)		GÜÇ YOĞUNLUĞU (V/m <sup>2</sup> )	
	Tek cihaz için limit	Toplam limit	Tek cihaz için limit	Toplam limit	Tek cihaz için limit	Toplam limit
1 MHz-10 MHz	$22f^{1/2}$	$87f^{1/2}$	$0,18/f$	$0,73/f$	-	-
10 MHz-400MHz	7	28	0,02	0,073	0,125	2
400 MHz-2 GHz	$0,341f^{1/2}$	$1,375f^{1/2}$	$0,0009f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$f/3200$	$f/200$
2GHz-60GHz	137	61	0,04	0,16	0,625	10

Son zamanlarda kablosuz iletişimde kullanılan antenler önemini arttırmaya başlamıştır. Kablosuz olarak veri alış verişi, veri boyutuna bağlı olarak yeni tasarımlarla sunulmaktadır. Bu antenlerin küçük boyut, düşük maliyet ve yüksek verimliliğe sahip olmaları istenir [50].

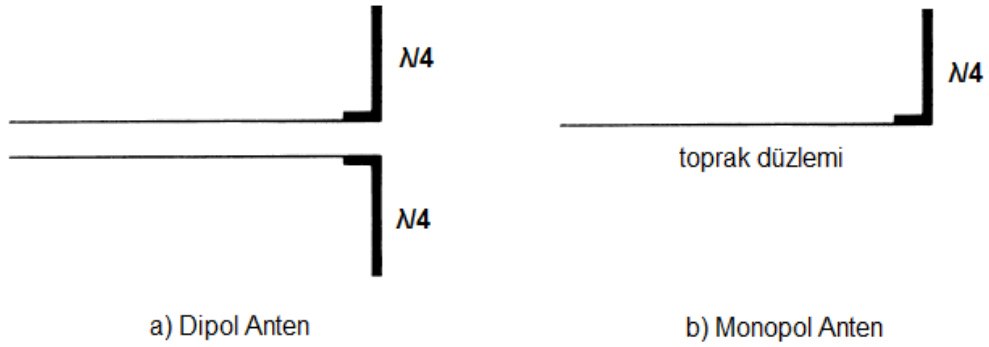
Kablosuz sistemlerde en çok kullanılan anten çeşitleri şunlardır;

- Monopol anten
- Sarmal (Helix) anten
- PIFA (Planar Inverted-F Antenna )
- PMA (Planar Monopole Antenna)

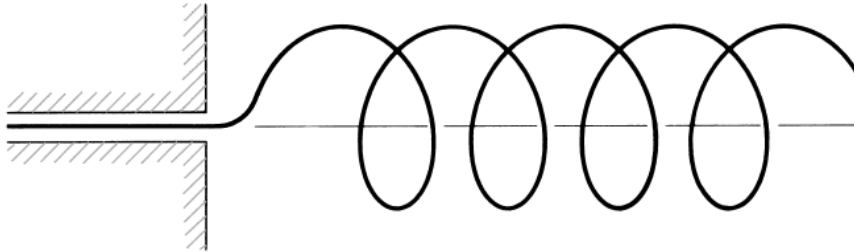
1990'lardan önce tüm cep telefonlarında dış anten (External) kullanılmıştır. Kullanılan dış antenler sarmal, monopol ve bu ikisinin kombinasyonu olan antenlerdir. 1996 yılında Danimarkalı bir firma Hagenuk adlı yeni bir cep telefonu üretti. Bu cep telefonunda iç (internal) anten olarak yarı anten kullanıldı. Bir yıl sonra Nokia 8810 model cep telefonunu üretti. Bu modelde yarı anten kullanıldı. Daha sonra Nokia iç anten kullanarak başka modeller üretmeye başladı. Farklı türde iç antenler kullandı ve yeni teknolojilerden yararlandı.

Cep telefonunun dış yüzeyinde bulunan antenler monopol ve sarmal antenlerdir. Cep telefonlarında çoğunlukla yönsüz antenler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan antenlerin başında çeyrek dalga boyu monopol

antenler gelmektedir.  $360^\circ$  alana monopol anten ile eşit ışımaya yapılabilmektedir. Çoğunlukla dikey polarizasyonlu olarak kullanılırlar. İndüktif ve kapasitif yüklenebildikleri için anten boyu küçültülebilir. Şekil 2.7’de, dipol ve monopol anten, Şekil 2.8’de sarmal anten gösterilmiştir. Monopoll antenler zamanla yerini ayarlanabilir monopoll-sarmal anten kombinasyonuna bırakmıştır. Monopoll antenler tek rezonans frekansta çalışırken sarmal anten kullanılarak çift bant yapılmıştır [51-53].



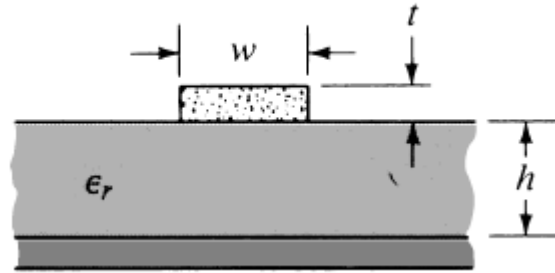
**Şekil 2.7.** a) Dipoll anten b) Monopoll anten [54]



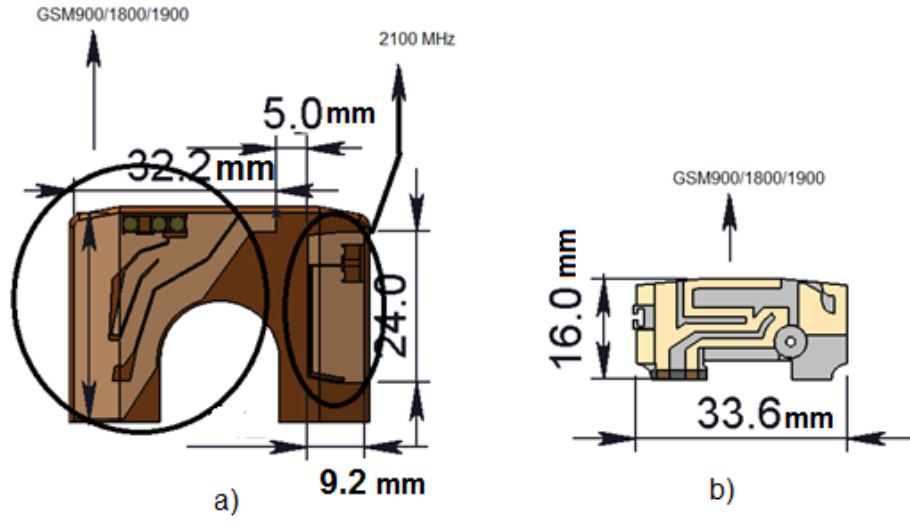
**Şekil 2.8.** Sarmal (Helix) anten [54]

Cep telefonunda iç anten kullanımı yarık antenle başlamıştır. Daha sonra PIFA (Planar inverted-F antenna ) ve topraklanmamış monopoll anten (PMA-Planer Monopoll Antenna) kullanılmıştır. PIFA anten çoğunlukla mikroşerit anten olarak bilinir. Monopoll ve sarmal antenler tek polarizasyonda çalışırken, mikroşerit antenler (PIFA’nın bir çeşidi) çoklu polarizasyonda çalışabilmektedir. Mikroşerit antenler hafif, küçük boyutlu, düşük maliyetli ve

düzlemsel biçimliliğinden dolayı kullanışlıdır [55]. Cep telefonunda kullanılan mikroşerit antenlerde üç farklı tasarım vardır. Bunlar; tek yarık, çift yarık ve parazitiktir. Tek yarık iki tane akım yolu oluşturur. Bu şekilde iki farklı rezonans frekansa duyarlılık sağlar. Her iki frekansta bant genişliğini artırır. İkinci tür olan çift yarık tasarımda ikinci yarık toprak düzlemi ile besleme arasına yerleştirilir. Yerleştirilen ikinci yarık üçüncü bir rezonans frekansa duyarlılık sağlar. Böylece çift yarık mikroşerit anten kullanımı ile üç farklı frekansın kullanımı sağlanır. Ayrıca yerleştirilen ikinci yarık iki anten arasında yüksek frekanslarda bant durduran filtre olarak davranır. Bu da iki antenin karşılıklı bağlaşımını engeller [56]. Rezonans frekansı artıran üçüncü tasarım, topraklanmış parazitiktir. Topraklanmış parazitik ile yüksek frekans bandında üç ayrı frekansa duyarlılık sağlanır. Bu sayede bu teknoloji ile üç frekanslı (GSM900/1800/1900) telefonlar kullanılabilir [57]. Şekil 2.9'da, mikroşerit anten yapısı, Şekil 2.10'da a) PIFA ve b) Planar Monopol Antenna (PMA) gösterilmiştir [58].



**Şekil 2.9.** Mikroşerit anten [54]



**Şekil 2.10.**a) Nokia 6630'a ait PIFA b) Samsung C408'ait PMA [58]

Tek yarık PIFA antenlerde rezonans frekans, eşitlik 2.8'de gösterildiği gibi, yarık genişliği ( $W$ ), yarık uzunluğu ( $L$ ), dielektrik sabiti ( $\epsilon_r$ ) ve ışık hızına ( $c$ ) bağlıdır.

$$f_r = \frac{c}{4(W + L)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.8)$$

İlk üretilen PIFA anten L şeklindedir. Aslında monopol antenin bükülmüş şeklidir. Böylece ışıma direnci ve anten boyu azalmıştır. F anten L antenden türetilmiştir. Cep telefonlarında kullanılan anten türlerinin avantaj ve dezavantaj olarak karşılaştırılması çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

**Çizelge 2.6.** Cep telefonunda kullanılan antenlerin avantaj ve dezavantajları

<b>DIŞ ANTEN</b>		
	<b>AVANTAJ</b>	<b>DEZAVANTAJ</b>
<b>MONOPOL</b>	Yüksek verim, basit tasarım	Yüksek SAR oranı, kapalı durumda düşük performans ve tek bantlı olması
<b>SARMAL</b>	Küçük boyut, basit tasarım ve uygun verim	Yüksek SAR oranı, tek bantlı olması
<b>MONOPOL + SARMAL</b>	Küçük boyut, basit tasarım ve elle çift bant yapılabilir	Büyük hacim, yüksek SAR ve çift bant için tasarım zorluğu
<b>İÇ ANTEN</b>		
<b>PIFA</b>	Dış antene göre küçük boyut, çoklu bant için tasarım kolaylığı, düşük SAR ve akım kontrolü	Dış antene göre düşük kazanç ve bant genişliği, üretim zorluğu
<b>PMA</b>	Çok ince olması, sarmal anten performansı göstermesi	Yüksek SAR oranı

#### **2.1.6. SAR ve Limitleri**

SAR (Specific Absorption Rate-Özgül Soğurma Oranı), EM radyasyonun canlı dokular tarafından emilme oranıdır. Canlı dokular ile SAR arasındaki ilişki E alan (V/m), M alan (A/m) ve güç yoğunluğu ( $W/m^2$ ) gibi parametreler ile doğrudan ifade edilemez [59]. Bu yüzden canlı dokular ile EM radyasyon arasındaki ilişkinin nasıl kurulacağı akla gelir. 1971 yılında



yapılan bir çalışmayla Schwan tarafından SAR değerini belirlemek için doku içerisinde EM radyasyondan dolayı oluşan akım yoğunluğu kullanılmıştır. Schwan tarafından bulunan SAR formülü eşitlik 2.9'de gösterilmiştir [60].

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2} \left( \frac{W}{m^3} \right) \quad (2.9)$$

Formüldeki  $\sigma$  doku iletkenliği, E elektrik alan şiddetidir. Bu formül NCRP ve ANSI tarafından SAR adıyla adlandırılmıştır. Ayrıca SAR birim kütledeki EM enerjinin zamana göre türevi olarak ifade edilebilir. Bu ifade eşitlik 2.10'da gösterilmiştir.

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right) \left( \frac{W}{kg} \right) \quad (2.10)$$

Formüldeki  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) canlı dokuya ait kütle yoğunluğu, V ( $m^3$ ) dokunun hacmidir.

EM dalga ile doku arasındaki etkileşimi E alan, SAR veya dokuda indüklenmiş akım ile ifade edebiliriz. Çünkü E alan, SAR ve dokuda indüklenen akım eşitlik 2.11 ile ilişkilidir.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \left( \frac{W}{kg} \right) \quad (2.11)$$

Formüldeki E, doku içerisindeki E alanın rms (etkin) değeri,  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) canlı dokuya ait kütle yoğunluğu,  $\sigma$  (S/m) dokunun iletkenliğidir. Eğer E alanın maksimum değeri (peak) kullanılırsa formül 1/2 ile ( $E_{peak}^2/2 = E_{rms}^2$ ) çarpılmalıdır [59,61].

SAR, dokuya gönderilen EM dalganın dokuda sebep olduğu sıcaklık artışı vasıtasıyla da hesaplanabilir. SAR ile doku üzerinde meydana gelen sıcaklık artışı arasındaki ilişki eşitlik 2.12'de gösterilmiştir.

$$SAR = \frac{c_H \Delta T}{\Delta t} \left( \frac{W}{kg} \right) \quad (2.12)$$

Formüldeki  $c_H$  (j/kg.°C) EM dalga uygulanan dokunun özgül ısı kapasitesi,  $\Delta T$  (°C) EM radyasyona maruziyet sonucunda meydana gelen sıcaklık artışı,  $\Delta t$  (s) ise dokunun EM radyasyona maruz kalma süresidir.

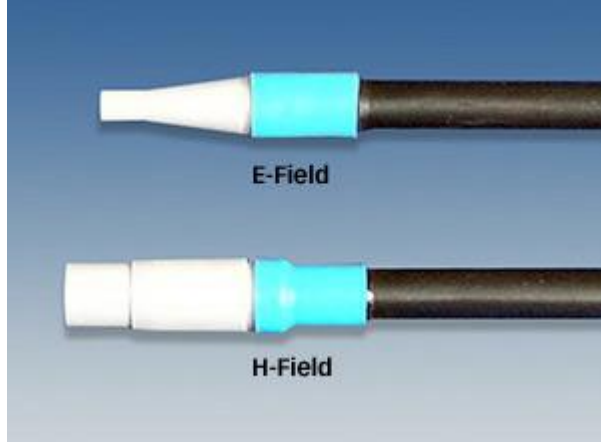
Sıcaklık ölçümü ile SAR hesabını, ilk kez Mittleman ve arkadaşları 1941 yılında yapmışlardır [62]. Kullandıkları birim W/litre olmuştur. Daha sonra 1958 yılında Cogan ve arkadaşları bu birimi W/kg olarak değiştirmişlerdir [63]. Canlı dokularda kan akışı ile vücut fazla ısıyı yok etmeye çalıştığı için ölçüm biraz zorlaşmaktadır. Bu yüzden kan akışı olmayan bir dokunun kullanılması daha doğru sonuç verecektir.

Sonuç olarak SAR belirlenirken 3 yöntem kullanılır [61].

- Birinci yöntem: Canlı dokuya EM radyasyon gönderilir. Gönderilen ve yansıyan dalgaların güçleri arasındaki fark doku tarafından emilen radyasyonun gücüdür. Böylece bulunan güç (W) dokunun kütlesine (kg) bölünerek SAR (W/kg) hesaplanır.

- İkinci yöntem: Canlı dokuya EM radyasyon gönderilir. Dokuda emilen EM radyasyondan dolayı iç E alan oluşur. E alan probu ile değeri ölçülerek belirlenir. E ve M alan probu şekil 2.11'de gösterilmiştir. Belirlenen değer in rms değeri eşitlik 2.11'de yerine konularak SAR hesaplanır.

- Üçüncü yöntem: Canlı dokuya EM radyasyon gönderilir. Dokuda emilen EM radyasyondan dolayı sıcaklık artışı meydana gelir. Dokudaki sıcaklık farkı ölçülür. Dokuya EM radyasyonun uygulanma süresi ve ölçülen sıcaklık farkı eşitlik 2.12'de yerine konularak SAR değeri hesaplanır.



**Şekil 2.11.** E ve M alan probu [64]

Deri, kemik, kornea gibi farklı dokularda, doku parametreleri farklılık gösterdiği için EM radyasyon emme oranları (SAR değerleri) farklılık gösterirler. Bu dokulardaki kütle yoğunlukları ve doku iletkenlikleri farklıdır. Bu iki parametre EM radyasyonun frekansına bağlı olarak değişmektedir. İletkenlik dokudaki su oranına da bağlıdır. Bazı dokular (göz, kas, deri, karaciğer vb.) su oranı yüksek olan dokulardır. Bazı dokular ( beyin, akciğer vb.) orta miktar su içer. Bazı dokular ise (yağ ve kemik) düşük oranda su içerir. Frekans artışı dokunun iletkenliğini de arttırmaktadır [65]. SAR değerini etkileyen başka bir parametre dokunun dielektrik özelliğidir. Dielektrik özelliği dokudaki su oranı ve dokuya uygulanan EM radyasyonun frekansı tarafından belirlenir. Frekans arttıkça dielektrik sabitinin değeri düşer. Dielektrik sabiti dokudaki E alan dağılımını belirlemektedir. E alan ise SAR formülünde bulunmaktadır. Yani dielektrik özellik SAR değerini belirleyen parametrelerden birisidir. Çizelge 2.7’de frekansa bağlı olarak bazı dokuların kütle yoğunlukları, doku iletkenlikleri, özgül ısı kapasitesi ve dielektrik katsayıları verilmiştir [65].

**Çizelge 2.7.** Bazı dokuların kütle yoğunluğu, doku iletkenliği, özgül ısı kapasitesi ve dielektrik katsayıları [65]

NO.	DOKU	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_H$ (j/kg.°C)	FREKANS			
				900 MHz		1800 MHz	
				$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$
1	Kemik	1850	1590	8,00	0,11	8,00	0,16
2	Deri	1100	3662	34,50	0,60	32,00	1,52
3	Kas	1040	3639	58,50	1,21	55,00	1,70
4	Beyin	1030	3600	55,00	1,23	53,00	1,70
5	Göz merceği	1050	3000	44,50	0,80	41,00	1,29
6	Kornea	1040	4200	52,00	1,85	50,00	2,32

İnsan vücudunda 1 kg'lık dokuda 1 °C sıcaklık artışı meydana gelmesi için o dokunun 4 W güç emmesi gerekmektedir. Normal hayatta 4 W/kg'lık bu oranın 50'de 1'i sınır olarak kabul edilir. ABD'de FCC (Federal Communication Commission), Avrupa ve dünyanın bazı ülkelerinde ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), SAR limitleri belirlenmiştir. ABD ve Avrupa'daki SAR limitleri Çizelge 2.8'de gösterilmiştir [41-43].

**Çizelge 2.8.** ABD ve Avrupa'daki SAR limitleri

	TÜM VÜCUT SAR (W/kg)	BÖLGESEL SAR (W/kg)	ORTALAMA ZAMAN	ORTALAMA KÜTLE
ABD (FCC)	0,08	1,6	30 dakika	1 gr
AVRUPA (ICNIRP)	0,08	2	30 dakika	10 gr

Kafa bölgesi, bölgesel SAR olarak kabul edilmiştir. Türkiye’de kabul edilen SAR limiti, Avrupa birliği ülkelerinin ve diğer bazı ülkelerin kabul ettiği ICNIRP’nin de limiti olan 2 W/kg değeridir [41]. ABD’de FCC ve IEEE’nin 1991’de belirledikleri limitler kabul edilmiştir. Ancak 2005 yılında IEEE, ICNIRP’nin limitlerini kabul etmiştir. Ancak ABD ve Kanada, FCC limiti olan 1,6 W/kg değerini uygulamaya devam etmiştir [42,43,49].

## 2.2. Termal Görüntülemenin Temelleri

Sıcaklığı 0 K üzerinde olan her cisim EM ışımaya yapmaktadır. Bu ışımaya EM spektrumun bazı bölgelerine karşılık gelmektedir. Kızıl ötesi (KÖ-IR) bantta yapılan ışımalar gözle görülemezdir. Çünkü insan gözü sadece görünür bantta yapılan ışımları görebilmektedir. Kızıl ötesi bantta yapılan ışımalar, termal görüntüleme sistemleri ile görüntülenebilmektedir. Kızıl ötesi bant EM spektrumun 0,8  $\mu\text{m}$  -1000  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Kızılötesi bant şekil 2.5’de görülmektedir. Kızılötesi radyasyonu ilk defa Sir William Hershel 1800’lü yılların başında bulmuştur. Sir William Hershel güneş ışığını bir prizmadan geçirmiştir. Güneş ışığı prizmadan renklere ayrılarak çıkmıştır. Her bir renk üzerine termometre yerleştirmiş ve sıcaklıklarını ölçmüştür. Bunun sonucunda her bir rengin farklı sıcaklığa sahip olduğunu görmüştür. Yapılan ölçümde termometredeki sıcaklık sırasıyla mor, mavi, yeşil, sarı, turuncu ve kırmızı renklere doğru arttığı ve kırmızı renkten sonra termometrede sıcaklık artışı devam ettiği hatta kırmızıdan daha fazla sıcaklık olduğu keşfedilmiştir. Sir William Hershel bu bölgeye ultra kırmızı demiştir. 1881 yılında Abney bu ışımaya IR (Infrared-Kızılötesi) adını vermiş ve Hershel’de bu isimle çalışmalarını devam ettirmiştir [66].

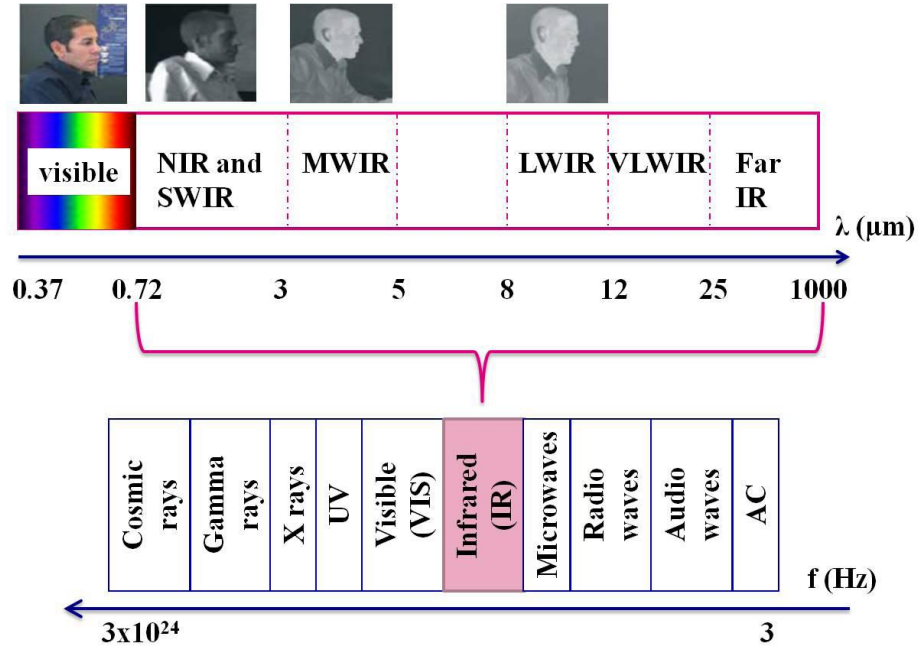
Hershel’in deneyinde sıcaklık ile EM radyasyonun dalga boyu arasında bir ilişki olduğu görülmektedir. Bilim adamları yaklaşık 100 yıllık bir çalışma sonucunda bu bilgiye sahip olmuşlardır. 1830 yılında 0 K üzerinde sıcaklığa sahip olan her cismin ışımaya yaptığı anlaşılmıştır. 1856 yılında Kirchhoff soğurma ve salınım yasalarını bulmuştur. 1879 yılında J. Stefan 4. Kuvvet yasasını deneysel olarak, 1884 yılında L. Boltzmann teorik olarak bulmuştur. 1893 yılında Wien sıcaklık ile dalga boyu arasındaki ilişkiyi

bulmuştur. 1900 yılında Rayleigh EM ışımının gücünü sıcaklık ve dalga boyuna bağlı olarak ifade etmiştir. 1905 yılında Planck kuantum teorisini bulmuştur. Kızılötesi ışımının tarihi gelişimi bu şekildedir.

Kızılötesi bant görünür ışık ile mikrodalga arasında bulunmaktadır. KÖ bant alt bantlara ayrılmıştır. Bunlar;

- 0,8  $\mu\text{m}$  – 3  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahip olan Kısa Dalgaboyu Kızılötesi (Short Wavelength Infrared-SWIR),
- 3  $\mu\text{m}$  – 5  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahip olan Orta Dalgaboyu Kızılötesi (Mid Wavelength Infrared-MWIR),
- 8  $\mu\text{m}$  – 12  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahip olan Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (Long Wavelength Infrared-LWIR),
- 12  $\mu\text{m}$  – 25  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahip olan Çok Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (Very Long Wavelength Infrared-VLWIR),
- Son olarak 25  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük dalga boyuna sahip Uzak Kızılötesi (Far Infrared) bant kızılötesi bandın alt bantlarıdır [66].

Şekil 2.12'de EM spektrumun kızılötesi bölgesi gösterilmiştir [67].



Şekil 2.12. Kızılötesi alt bantları [67]

### 2.2.1.EM Dalganın Enerji-Frekans İlişkisi

Alman bilim adamı M.K.E.L. Planck, ışımının enerjisinin sürekli olmadığını, frekansa bağlı olarak bazı değerler aldığını belirtmiştir. Bu durumda bir fotonun enerjisi eşitlik 2.5'te gösterilmiştir. Işımanın frekansı ile enerjisi doğru orantılıdır. Işımanın frekansı artarsa enerjisi de artmaktadır. Ayrıca ışımının enerjisi dalga boyu ile ters orantılıdır. Dalga boyu artarsa ışımının enerjisi azalmaktadır. Bu perspektifte RF ve Kızılötesi bant kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılır;

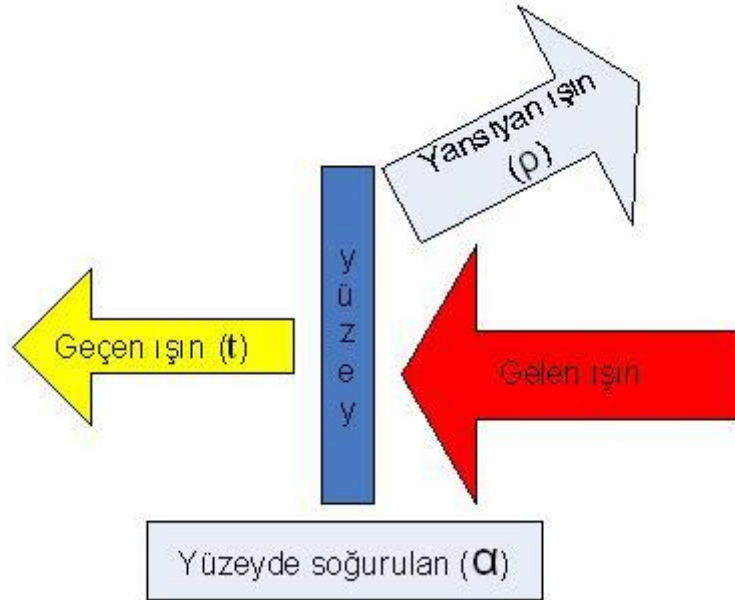
- EM spektrumun RF ve kızılötesi bantlarına bakıldığında, RF bandın frekansı kızılötesi bandın frekansından daha küçük ve dalga boyu daha büyüktür. Bu yüzden kızılötesi bandın enerjisi, RF bandın enerjisinden fazladır.
- Tüm cisimler kızılötesi bantta ışımaya yaparlar ve bu bantta yapılan ışımalar termal görüntüleme sistemleri ile algılanabilirler.
- Kızılötesi bantta yapılan ışımalar, daha büyük bant genişliğine sahiptir.
- RF dalgaları hava koşullarından çok fazla etkilenmez. Yağmur, sis, kar gibi çeşitli hava olayları karşısında RF dalgaları ilerleyebilir. Bu şekilde veri aktarımı ve haberleşme RF dalgaları ile kötü hava şartlarında da gerçekleşir. Kızılötesi banttaki ışımalar, hava koşullarına çok fazla bağımlıdır. Bu ışımalar atmosferdeki bazı moleküller tarafından emilmektedir. Bazı moleküllere çarparak enerjileri azalmakta ve yönleri değişmektedir. Bu sebeplerden dolayı kötü hava şartlarında ve farklı ortam şartlarında bu bantta çalışan sistemler düşük performans göstermektedir.
- Her cismin kızılötesi bantta ışımaya yapması, bu bantta çalışan sistemlerde hata oranını arttırmaktadır.

### 2.2.2.Kızılötesi Işıma Yasaları

Kızılötesi enerji bir yüzeye ulaştığında üç durumla karşılaşır: Işıma yüzeyden yansiyabilir, içinden geçebilir veya yüzey tarafında emilebilir. Geçirgenlik çoğunlukla sıfırdır. Bu yüzden yüzeye çarpan ışımaya ya emilir ya da yansıtılır. Soğurulan ya da emilen ışımının toplam enerjisi, yüzeye gelen

enerjiye eşittir. Bu eşitlik **Kirchhoff yasası** olarak bilinir. Bu yasaya göre bir yüzeye ışımının toplam enerjisi korunur. Yüzeğe gelen ışımının enerjisi yüzeyde üç durumla karşılaşır. Bunlar emilme ( $\alpha$ ), yansıma ( $\rho$ ) ve geçme ( $t$ )'dir. Yani enerji yüzey tarafından emilebilir, yüzeye çarpıp yansıyabilir veya cismin yüzeyinden içeri girip öbür tarafından çıkabilir. Buna göre yansıyan, emilen ve geçen ışınların toplam enerjisi yüzeye gelen enerjiye eşittir. Kirchhoff yasası eşitlik 2.13'te ve Şekil 2.13'te gösterilmiştir [68].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.13)$$



**Şekil 2.13.** Kirchhoff yasası

Şekil 2.13'teki;

$\alpha$ , soğurulma (emilme) oranı=Soğurulan enerji/Gelen enerji

$\rho$ , yansıma oranı=Yansıyan enerji/ Gelen enerji

$t$ , geçirgenlik oranı=Geçirilen enerji/ Gelen enerjidir.

Atmosferik geçirgenlik, dalga boyuna ve atmosferin soğurma katsayısına ( $\alpha$ ) bağlı olarak eşitlik 2.14'te gösterilmiştir [68].



$$t(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda)x} \quad (2.14)$$

Teorik olarak üzerine gelen tüm ışınmayı soğuran ve soğurduğu tüm ışınmayı yayan cisimlere kara cisim (blackbody) adı verilir. Bu tür malzemelerde yüzey şekli ve malzeme cinsi önemli değildir. Kara cismin ışınması yalnız sıcaklığa bağlıdır. Kara cismin en önemli özellikleri;

- Tüm dalga boylarındaki ışınmaları tamamen soğurması,
- Mükemmel yayıcı olması,
- Üzerine gelen ışınmanın hiçbir bölümünü yansıtmaması ve geçirmemesidir.

Cismin yayıcılığı (emissivity)  $\varepsilon$  ile gösterilir. Dalga boyuna bağlı bir parametredir. Kara cismin yayıcılık katsayısı 1'dir. Yani mükemmel yayıcılığa sahiptir. Gerçek hayatta kara cisim özelliği gösteren malzeme bulunmamaktadır. Ancak kara cisme çok yakın davranan malzemeler vardır. Örneğin karbon ve gezegenler, üzerine düşen ışınmanın çoğunluğunu soğururlar. Yüzeyi parlak olmayan cisimlerin yayıcılıkları büyüktür. Yayıcılığı 1'den küçük ve sabit olan malzemelere gri cisim denir. Örneğin insan vücudu gri cisim gibi davranır. Yayıcılık gerçek cisimle kara cisim arasındaki ilişkiden ortaya çıkmıştır ve eşitlik 2.15'te gösterilmiştir. Bazı malzemelerin yayıcılık katsayıları Çizelge 2.9'de gösterilmiştir [69].

$$\varepsilon = \frac{M(\lambda, T)_{cisim}}{M(\lambda, T)_{karacisim}} \quad (2.15)$$

**Çizelge 2.9.** Bazı materyallerin yayıcılık değerleri [69]

MATERYAL	YAYICILIK ( $\epsilon$ )
Kara cisim	1
İnsan derisi	0,98
Saf su	0,96
Karbon	0,95
Parlatılmış cam	0,94
Ağaç	0,90
Çelik	0,70
Parlatılmış demir	0,21
Parlatılmış alüminyum	0,04
Parlatılmış gümüş	0,03
Parlatılmış altın	0,02

Çizelge 2.9'a göre insan vücudu kara cisme yakın bir oranda yayıcılık değerine sahiptir. İnsan derisi gri cisimdir. Yani yayıcılığı sabittir. Çizelgeye göre metalik özelliğe sahip malzemeler düşük yayıcılığa sahiptir. Üzerine gelen radyasyonu emmeden yansıtırlar.

**Planck yasası**, kara cisim tarafından dalga boyu ve sıcaklığa bağlı olarak yapılan kızılötesi ışınımı ifade eder. Farklı sıcaklıklarda kara cisim farklı miktar ışınım yapmaktadır. Eşitlik 2.16'da Planck yasası gösterilmiştir.

$$M_P = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)} \left( \frac{W}{cm^2 \mu m} \right) \quad (2.16)$$

$M_P$ , vericilik veya ışınım miktarı [ $W/cm^2 \cdot \mu m$ ],

$h$ , Planck sabiti ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s),

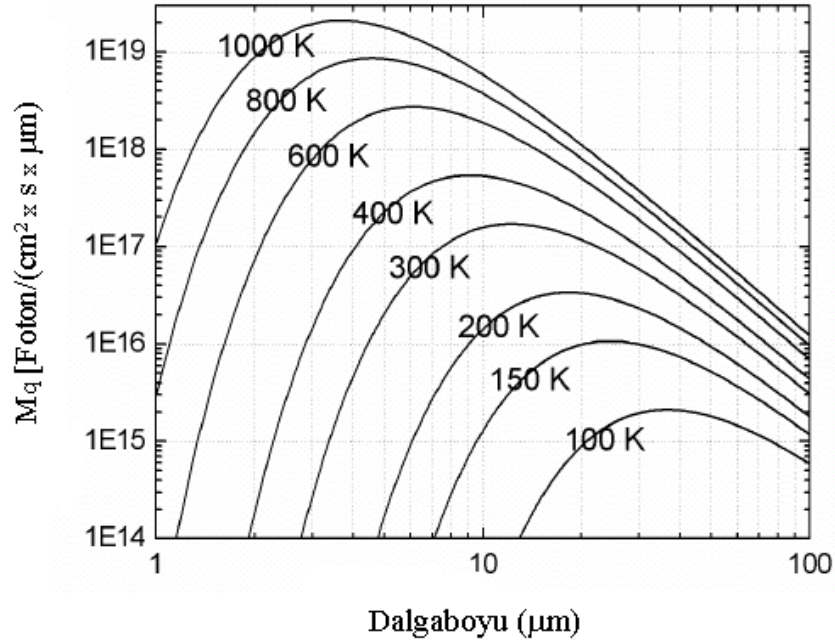
$c$ , ışık hızı ( $3 \times 10^8$  m/s),

$\lambda$ , dalga boyu (mm),

$T$ , sıcaklık (K),

k, Boltzmann Sabiti ( $1,380658 \times 10^{-23}$  J/K)'dir.

Planck yasası, T sıcaklığına sahip bir cismin, herhangi bir dalga boyundaki yaptığı ışımaya miktarı hakkında bilgi vermektedir. Şekil 2.14'te Sıcaklığa bağlı olarak kara cisim tarafından yapılan ışımaya gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça, kara cisim tarafından yapılan maksimum ışımaya dalga boyu azalmaktadır. Herhangi bir sıcaklıktaki maksimum vericilik veya maksimum ışımaya miktarı sıcaklık artışıyla beraber görünür dalga boyuna ( $0,37 \mu\text{m}$ - $0,73 \mu\text{m}$ ) doğru kaymaktadır. Belli bir sıcaklıktaki maksimum ışımaya yapıldığı dalga boyunu veren yasa Wien yer değiştirme yasasıdır (Wien's displacement law). Bu yasa eşitlik 2.17'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Kara cismin sıcaklığa bağlı vericiliği [70]

$$\lambda_{\text{max}} (\mu\text{m}) = \frac{2898(\mu\text{m.K})}{T(K)} \quad (2.17)$$

**Wien kayma yasası**, Planck yasasından türetilmiştir. Planck yasasının dalga boyuna göre türevi alınmış ve sıfıra eşitlenmiştir. Böylece her hangi bir sıcaklıktaki maksimum vericiliğin bulunduğu dalga boyu hesaplanmıştır.

Eşitlik 2.17'deki T, Kelvin cinsinden sıcaklıktır ( $K=^{\circ}C+273$ ). Buna göre insan vücudunun maksimum şiddette ışıma yaptığı dalga hesaplanabilir. İnsan vücudu  $36,5^{\circ}C$  yani  $309,5 K$ 'dir. Maksimum ışımanın yapıldığı dalga boyu  $2898/309,5=9,36 \mu m$ 'dir.  $9,36 \mu m$  LWIR bandının içerisinde yer almaktadır. Yani  $9,36 \mu m$ 'de çalışan bir termal kamera vücut sıcaklığında en iyi görüntülemeyi yapabilir anlamına gelmektedir. Buna benzer şekilde güneşin sıcaklığı  $6000 K$ 'dir. Güneşten yapılan maksimum şiddette ışımanın yapıldığı dalga boyu Wien kayma yasasına göre  $0,48 \mu m$  olacaktır. Bu dalga boyu görünür dalga boyuna karşılık gelmektedir.

**Stefan-Boltzmann yasası**, sıcaklığı T olan bir cismin tüm dalga boylarında yaptığı toplam ışımayı ifade eden yasadır. Aslında cisimler sıcaklığı ne olursa olsun çevresinden gelen ışımanın bir kısmını soğurur ve bir kısmını da çevresine yayırlar. Bu yasa ile yayılan tüm ışıma miktarı hesaplanabilmektedir. Etrafa yapılan ışıma miktarı cismin sıcaklığı, yüzey alanı ve yayıcılık ile ilişkilidir. Stefan-Boltzmann yasası eşitlik 2.18'de gösterilmiştir.

$$W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (2.18)$$

2.18'deki;

$\varepsilon$  , cismin yayıcılığı,

$\sigma$  ,Stefan-Boltzmann sabiti ( $5,670 \times 10^{-8} (W/m^2 \times K^4)$ ),

T, Kelvin cinsinden cismin sıcaklığıdır.

Stefan-Boltzmann yasasına göre insan vücudunun birim yüzeyinden tüm dalga boylarında yapılan toplam ışıma şu şekilde hesaplanabilir.

İnsan derisinin yayıcılığı =0,98

Vücut sıcaklığı =309,5 K

Buna göre toplam ışıma =509,86  $W/m^2$  olarak hesaplanır.

İnsan vücudunun yüzey alanı eşitlik 2.19 ile hesaplanır [71]. Eşitlik 2.19'daki W, vücut ağırlığı (kg), H ise boy (m)'dur.

$$\text{Vücut Yüzey Alanı} = W^{0,425} \cdot H^{0,725} \cdot 0,007184 (m^2) \quad (2.19)$$

Denkleme göre insan vücut yüzey alanı=2 m<sup>2</sup> olarak hesaplanır.

Vücuttan yapılan toplam ışıma= 509,86 (W/m<sup>2</sup>)×2 (m<sup>2</sup>) = 1 kW

### 2.2.3. Atmosferik Geçirgenlik

Atmosfer, dünyayı çevreleyen, Dünyadaki canlıları güneşin zararlı ışınlarından, meteorlardan ve kozmik ışıklardan koruyan bir gaz ortamıdır. Yüksekliğe bağlı olarak gaz yoğunluğu, gaz türleri ve sıcaklığı değişmektedir.

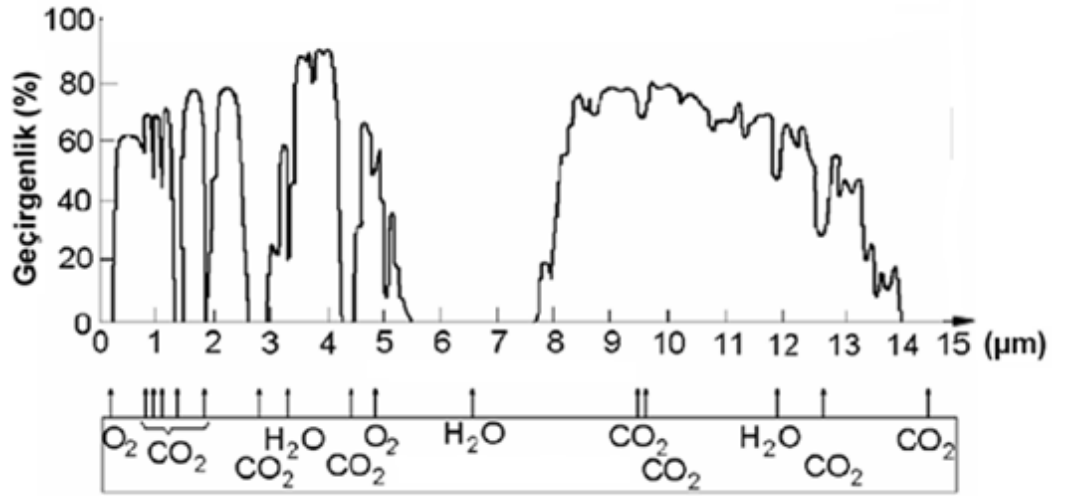
Atmosfer, altı katmandan oluşur. Dünyaya en yakın katman troposferdir. Başlangıcı ve sonu arasında belirli bir basınç farkı vardır. İçerisinde CO<sub>2</sub>, su buharı, bulut, sis gibi kızılötesi ışımayı zayıflatan unsurlar bulunur. Bu zayıflatıcılar özellikle kızılötesi banttaki ışınları soğurur ve saçarlar. Troposferde düşük irtifalarda su buharı baskın zayıflatıcı moleküldür. Bu tabaka yeryüzünden 11 km irtifaya kadar ulaşır. Troposferden sonra stratosfer tabakası bulunur. Stratosferde UV (mor ötesi) ışınları emen ve dünya yüzeyine ulaşmasını engelleyen ozon (O<sub>3</sub>) tabakası bulunur. Stratosfer yeryüzünde itibaren 50 km irtifaya kadar uzanır. Genellikle optik modeller bu katmanda son bulur. Bu tabakadan sonra sırayla Mezosfer, İyonosfer, Termosfer ve Ekzosfer bulunur. Toplam atmosfer boyutu 500 km irtifaya kadar uzanır. İyonosfer katmanında RF haberleşmesi önemli bir yere sahiptir [72].

Atmosfer %78 azot, %21 oksijen, %1 ise su buharı, CO<sub>2</sub>, sıvı veya katı parçacıklardan oluşur. Havadaki parçacıklar toz, pus, dolu ve kar gibi moleküllerdir. Oksijen UV ışınların emiliminde etkin bir role sahiptir. Kızılötesi ışımlar atmosferdeki gaz ve moleküllerden dolayı zayıflar. Yani enerji kaybederler. Atmosferde ilerleyen kızılötesi ışımlar üç durumla karşılaşır: Kırılma, emilme ve saçılma. Atmosferde ilerleyen kızılötesi ışımaların enerjisi bu üç sebepten dolayı azalır ve ısıya dönüşür [72]. Soğurmanın ışıma şiddetine etkisi eşitlik 2.14'te gösterilmiştir.

Atmosfer içerisindeki gazlar kızılötesi ışımların geçebileceği belirli dalga boylarında atmosferik geçirgenlik pencereleri oluşturur. Özellikle su buharı, CO<sub>2</sub> ve oksijen atmosferik geçirgenlik pencerelerinin oluşmasında etkilidir. Düşük irtifalarda yani yeryüzüne yakın mesafelerde su buharı

yoğunluğu fazladır. Bazı dalga boylarında saçılma ve emilme o kadar fazladır ki kızılötesi ışıma kısa bir mesafede enerjisini tamamen kaybeder. İrtifa arttıkça kızılötesi ışımının ilerlemesi kolaylaşır. Çünkü yüksek irtifalarda su buharı yoğunluğu düşüktür. Atmosferik geçirgenlik kızılötesi ışımının dalga boyuna ve mesafeye bağlı olarak değişir [73].

Atmosferik geçirgenlik pencereleri ve bu pencerelerin oluştuğu dalga boylarındaki molekül yoğunlukları ve türleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir [74].



**Şekil 2.15.** Atmosferik geçirgenlik pencereleri ve bu pencereleri oluşturan dalga boyundaki etkin moleküller [74]

Atmosferik geçirgenlik pencereleri dalga boyuna göre şu şekilde sıralanır;

- 0,8 µm -3 µm,
- 3 µm -5 µm,
- 8 µm -12 µm.

Kızılötesi ışımının zayıflamasının sebeplerinden birisi de saçılmadır. Saçılma sırasında ışıma enerjisini korur ancak yönü değişir. Saçılma genellikle havadaki sıvı veya katı parçacıkların boyutuna ve ışımının dalga boyuna bağlıdır. Kızılötesi ışımının dalga boyu çarptığı parçacığın çapından büyük ise saçılma küçük, çapından küçük ise saçılma büyük olur. Araçlardaki

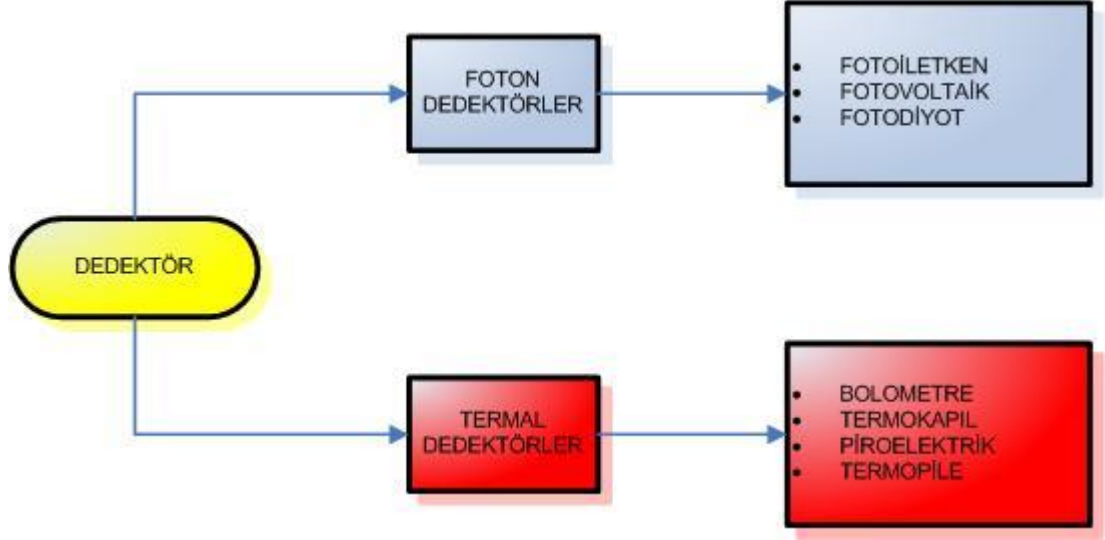
sis farlarının sarı olmasının sebebi sarı ışığın dalga boyunun sis moleküllerinin çapından büyük olmasıdır. Bu şekilde saçılma az olacaktır. İki tür saçılma vardır. Bunlar;

- Mie saçılması ve
- Rayleigh saçılmasıdır.

Mie saçılması, kızılötesi ışımının dalga boyu çarptığı parçacıkların boyutuna eşit olduğu durumda meydana gelen saçılmadır. Rayleigh saçılması, kızılötesi ışımının dalga boyu çarptığı parçacıkların dalga boyundan büyük ise meydana gelen saçılmadır. Rayleigh saçılmasında dalga boyuna bağımlılık Mie saçılmasına göre daha fazladır. Dalga boyu arttıkça saçılma oranı azalmaktadır. Gökyüzünün mavi renkte görünmesinin sebebi Rayleigh saçılmasıdır.

#### **2.2.4. Kızılötesi Dedektör Türleri**

Kızılötesi bantta çalışan ve algılama yapan sistemlerde kullanılan dedektörler, bu bantta yapılan ışımadan gelen fotonların enerjisini elektrik sinyallerine dönüştürürler. Meydana gelen elektrik sinyallerinin gücü kızılötesi ışımadan gelen fotonların dedektör üzerinde oluşturduğu bazı etkiler sonucunda elde edilir. Termal görüntüleme sistemlerinde dedektörlerin önemli bir görevi vardır. Dedektör türleri cihazın veya sistemin çalışma bandını, hassasiyetini ve çözünürlüğünü belirlemektedir. Çalışma bandını dedektörde kullanılan malzemenin özelliği ve çalışma sıcaklığı belirler. Kızılötesi dedektörler yarıiletkenler kullanılarak üretilir. Termal dedektör ve foton dedektörü olmak üzere Şekil 2.16'da gösterildiği gibi iki tür dedektör vardır.



**Şekil 2.16.** Dedektör türleri

### 2.2.4.1. Foton Dedektörleri

Foton dedektörleri üzerine düşen kızılötesi ışımadan gelen fotonlar, dedektördeki yarıiletken malzemede değerlik bandında bulunan elektronları iletkenlik bandına taşır. Bu yüzden iletkenlik bandında serbest taşıyıcı (elektron ve oyuk) sayısında artış meydana gelir. Serbest taşıyıcılar devrede bulunan gerilim kaynağının oluşturduğu E alan vasıtasıyla hareket eder ve akım oluşur. Malzemelerin değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında bulunan enerji farkına enerji aralığı (energy gap) denir. Farklı tür malzemelerde bu aralık farklı değerlerdedir. Yarıiletken malzemeye katkılama yapılarak bu enerji aralığı azaltılabilir. Katkılama yapılarak elde edilen yarıiletkenler, katkılama yapılmayan yarıiletkenlere göre daha hassas çalışırlar. Çünkü katkılama yapılarak daha az enerjili fotonlar ile değerlik bandından bir elektron iletkenlik bandına geçirilmiş olur ve bu elektron akımı arttırıcı bir etki oluşturur. Katkılama yapılmadığı durumda fotonun enerjisi ile enerji boşluğu aşılamayabilir. Foton dedektörlerin 77 K veya daha düşük sıcaklıklara kadar soğutularak çalışmaları gerekmektedir. Çünkü sıcaklık bir enerjidir. Bu enerji yarı iletkende serbest taşıyıcı oluşmasına sebep olur. Oluşan serbest taşıyıcılar kızılötesi ışımadan gelen fotonlar tarafından oluşturulmadığı için gürültü olarak adlandırılırlar ve sistem performansını

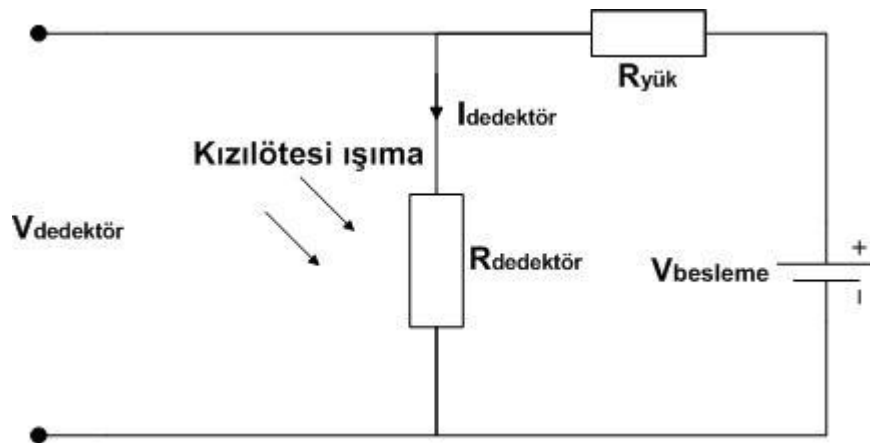


düşürdükleri için en az seviyede olması istenir. Foton dedektörlerde soğutucu kullanıldığı için sistem boyutu ve ağırlığı artmaktadır. Bu soğutmalı termal görüntüleme sistemleri için dezavantajdır. Bu yüzden bazı uygulamalarda tercih edilmemektedir. Ancak çalışma performansı ve algılama hassasiyeti termal dedektörlere göre daha yüksek olduğu için bazı uygulamalarda tercih edilirler. Foton dedektörleri; fotoiletken, fotovoltajik, fotoemiyon ve QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors) olmak üzere dört kategoriye ayrılır [75].

**Fotoiletken dedektör:** Fotoiletken dedektörlerde, dedektör üzerine düşen kızılötesi ışımadan gelen fotonlar yarıiletken malzemedeki değerlik bandında bulunan elektronları iletkenlik bandına taşırlar. Böylece serbest taşıyıcı sayısında artma meydana gelir. Serbest taşıyıcı sayısındaki değişim malzemenin iletkenliğini değiştirmektedir. Yarıiletken malzemenin iletkenliğindeki değişim fotonların enerjisi ile ilişkilidir. İletkenlikteki değişim algılamada kullanılır. Fotoiletken dedektörlerde, fotovoltajik dedektörlerde olduğu gibi bir p-n eklemi bulunmamaktadır [75]. Fotoiletken dedektörlerde kullanılan yarıiletken malzemeler ve duyarlı oldukları dalga boyları şunlardır;

- PbS (kurşun tuzu), 3  $\mu\text{m}$ -5  $\mu\text{m}$ ,
- HgCdTe alaşımları, 25  $\mu\text{m}$ 'ye kadar.

Fotoiletken dedektör ve okuma devresi yapısı Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.17.** Fotoiletken dedektör ve okuma devresi yapısı

**Fotovoltaik dedektör:** Fotovoltaik dedektörlerde p-n eklemi bulunmaktadır. Kızılötesi ışığa ile dedektör üzerine gelen fotonlar p-n eklemine çarparak elektron ve oyuk (hole) oluşturur. p-n eklemde oluşan serbest taşıyıcılar vasıtasıyla eklemde E alan meydana gelir. Dedektör üzerinde bu yüzden potansiyel fark meydana gelir. Bu tür dedektörlerde besleme gerilimine ihtiyaç yoktur. Çünkü p-n eklemdeki E alan serbest taşıyıcıları hareket ettirmek için yeterlidir. Dedektör üzerine düşen ışığa yoksa dedektör üzerinde karanlık akım vardır. Fotovoltaik dedektörlerin üç çalışma modu vardır: Açık devre, kısa devre ve geri beslemedir. Fotovoltaik kızılötesi dedektörler yakın kızılötesi bantta algılama yapmak için Si (Silisyum), MWIR'da algılama yapmak için InSb ve LWIR'da algılama yapmak için HgCdTe kullanılarak üretilirler. Dedektör üzerinden akan foton akımı eşitlik 2.20'de gösterilmiştir.

$$I_{foton} = \eta \cdot q \cdot A \cdot \Phi \quad (\text{Amper}) \quad (2.20)$$

Eşitlik 2.20'deki  $\eta$  kuantum verimliliği,  $q$  elektriksel yük,  $A$  fotodiyot alanı ve  $\Phi$  ise dedektör üzerine düşen foton akısıdır [76].

**Fotoemisyon dedektör:** Bu dedektör türü yüksek voltaj ve vakum ortamı gerektirdiği için pratik kullanıma çok uygun değildir. Bu dedektöre düşen fotonlar katoda çarparak elektron açığa çıkartırlar. Açığa çıkan elektronlar vakum ortamında hızlandırılarak anota yönlendirilirler. Elektronlar anotta toplanır. Bu tür dedektörlerin shot gürültüsünden dolayı soğutulmaları gerekmektedir.

#### 2.2.4.2. Termal Dedektörler

Termal dedektörler soğutma kullanılmayan, oda sıcaklığında çalışabilen, performansı ve ölçüm hassasiyeti foton dedektörlerine göre düşük olan dedektörlerdir. Ayrıca foton dedektörlerine göre tepki süresi, dedektivite, sinyal gürültü oranı gibi parametrelere göre daha düşük performansa sahiptir. Termal dedektörlerde, dedektör üzerine düşen kızılötesi ışımadan gelen fotonların soğurulması sonucunda sıcaklık artışı

meydana gelir. Bu sıcaklık artışı dedektörde bazı elektriksel değişimlere sebep olur. Meydana gelen elektriksel değişimler, dedektör türünü belirler. Elektriksel değişikliğin direnç değişimine sebep olduğu dedektör türü, bolometrik dedektör olarak adlandırılır. Elektriksel değişikliğin iç E alanında meydana geldiği dedektör türü, piroelektrik dedektör olarak adlandırılır. Elektriksel değişimin potansiyel farkta meydana geldiği dedektör türü ise termokapıl veya termopile olarak adlandırılır.

**Bolometrik dedektör:** Termal dedektörler arasında en çok kullanılan ve bilinen dedektördür. Bolometrik dedektörler kızılötesi ışımadan gelen fotonları soğuran bir yüzey, sıcaklık artışını ölçmek için kullanılan dirençli termometre ve direnci sıcaklıkla değişen bir malzeme içerir. Kızılötesi ışımadan gelen fotonlar genellikle yarıiletken bir malzemeden üretilen soğurucu yüzey tarafından soğurulur. Soğurulan foton enerjisi dirençte sıcaklık artışı ve dolayısıyla direnç büyüklüğünde değişime sebep olur. Bu değişiklik foton gücü ile ilişkilidir. Sıcaklık değişimi dirençli termometre ile ölçülür. Bolometrik dedektör sabit sıcaklıklı bir yapı ile gürültüden korunmaktadır. Bu tür dedektörlerde genellikle yarıiletken bir malzeme olan termistör kullanılır. Bazı uygulamalarda nikel ve platin kullanılır. Bu dedektördeki temel parametreler  $\alpha$  (sıcaklık sabiti) ve  $T$  (sıcaklık)'dır. Metallerin direnci sıcaklıkla arttığı için sıcaklık sabiti pozitifdir. Platin ve nikel sık kullanılan malzemelerin sıcaklık sabiti  $0,005 (K^{-1})$ 'dir [77].

**Termokapıl dedektör:** Seebeck etkisi ile çalışan dedektörlerdir. Soğuk ve sıcak yüzey arasında iki iletken bağlantı kurularak elde edilir. Sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı ne kadar büyük ise iki yüzey arasındaki bağlantıdan akan akım ve çıkış gerilimi de yüksek olmaktadır. Yüksek çıkış voltajı oluşturmak, soğuk-sıcak yüzey ve bunlar arasındaki bağlantıdan birden fazlası seri olarak bağlanır. Oluşturulan yapı dielektrik bir malzeme üzerine yerleştirilir. Dielektrik malzeme soğuk ve sıcak yüzeyleri izole eder. Kızılötesi radyasyonu soğuran bir bölge oluşturulur ve bu bölgeden soğurulan kızılötesi radyasyon soğuk sıcak yüzey arasındaki sıcaklık farkını artırır. Sıcaklık farkının artması çıkış voltajının artmasına sebep olmaktadır [77].

**Piroelektrik dedektör:** Bu tür dedektörler kendi içinde dipol momente sahiptir. Yani E alana ihtiyaç duymazlar. Dipol momentin büyüklüğü sıcaklığa bağlıdır. Kızılötesi ışımadan gelen fotonlar bu malzemeye çarparak, malzemenin sıcaklığını değiştirir. Sıcaklığı değişen malzemede meydana gelen yük hareketi dipol momentini değiştirir. Soğutmaya ihtiyaç yoktur.

### 2.2.5. Kızılötesi Dedektör Performans Parametreleri

Kızılötesi dedektörlerin performansını belirleyen önemli parametrelerden bazıları şunlardır;

- Kuantum verimliliği
- Gürültü ve gürültüye eşdeğer güç (NEP- Noise Equivalent Power)
- Dedektivite
- Tepkisellik (Responsivity)
- Gürültü eşlenikli sıcaklık farkı (NETD- Noise Equivalent Temperature Difference)
- Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF)

**Kuantum verimliliği:** Kızılötesi ışına ile gelen fotonların her birinin foton dedektörlerde oluşturduğu serbest taşıyıcı (elektron) sayısına kuantum verimliliği denir. Kuantum verimliliğinin yüksek olması dedektör hassasiyetinin yüksek olması anlamına gelir. Çünkü yüksek kuantum verimliliğine sahip dedektöre düşen her foton, fotoakımın oluşmasında rol oynar yani kayıp güç olmaz. Eşitlik 2.20'ye göre fotoakım ile kuantum verimliliği doğru orantılıdır. Kuantum verimliliği malzemenin dış yüzeylerin yansıtma katsayısı ve soğurma katsayısıyla ilişkilidir. Yansıtma katsayılarının düşük olması ve soğurma katsayısının yüksek olması kuantum verimliliğini arttırmaktadır. Yansıtma katsayısı  $r$ , soğurma katsayısı  $\alpha$  ve içsel kuantum verimliliği  $\eta_0$  ( $\eta_0$  çoğunlukla 1'dir) olan bir malzemenin kuantum verimliliği eşitlik 2.21'de gösterilmiştir [78].

$$\eta = \frac{\eta_0(1-r)[1-e^{-\alpha t}]}{1-re^{-\alpha t}} \quad (2.21)$$

**Tepkisellik:** Tepkisellik, dedektör çıkış sinyalinin (Voltaj veya Akım) dedektör üzerine düşen toplam kızılötesi ışımaya gücüne oranı olarak ifade edilir. Dedektörlerin önemli performans parametrelerinden birisidir. Sinyal-gürültü oranını içermez. Bu yüzden doğrudan sistem performansı tepkiselliğe göre değerlendirilemez. Tepkisellik eşitlik 2.22’de gösterilmiştir [79].

$$R_V = \frac{V_{out}}{\phi} \left( \frac{V}{W} \right) \quad \text{veya} \quad R_i = \frac{I_{out}}{\phi} \left( \frac{A}{W} \right) \quad (2.22)$$

**Gürültü ve NEP:** Gürültü, sistem performansını etkileyen ve düşüren istenmeyen bir etkidir. Ne kadar düşük seviyede olursa sistem performansını o kadar az etkiler. Termal görüntüleme sistemlerini etkileyen gürültülerden bazıları şunlardır: Shot gürültüsü, termal (Johnson) gürültü, 1/f (pembe) gürültüsü, kapasitör gürültüsü, beyaz gürültü, üretim-yeniden birleşim (generation-recombination) gürültüsü vb. gürültüler termal görüntüleme sistemleri için kaçınılmazdır. Ancak azaltılabilir. Gürültü eşdeğer güç seviyesi (NEP) dedektör performansını belirleyen önemli bir parametredir. Tanım olarak NEP, dedektörde gürültünün toplam gücüne karşılık gelen kızılötesi ışımaya gücüdür. Yani gürültü gücünün ışımaya gücüne eşit olduğu değerdir. NEP, gürültü geriliminin, kaynak gerilimine oranı veya gürültünün tepkiselliğe oranıdır. Eşitlik 2.23’te gösterilmiştir.

$$NEP = \frac{V_n}{R_v} (W) \quad \text{veya} \quad NEP = \frac{I_n}{R_i} (W) \quad (2.23)$$

**Dedektivite:** Dedektör hassasiyetini belirlemede kullanılan önemli bir parametredir. Tepkisellik gürültü içermemesine rağmen dedektivite, güç ve dedektör alanını da içerdiği için dedektörün performansını belirten önemli bir parametredir. Dedektivite dedektör alanını, ışımaya bant genişliğini ve gürültü eşdeğer güç oranını içerir. Dedektivite, eşitlik 2.24’te gösterilmiştir [78].

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \Delta f}}{NEP} = \frac{R \sqrt{A_D \Delta f}}{(V_n \text{ veya } I_n)} \left[ \frac{cm \sqrt{Hz}}{W} \right] \quad (2.24)$$

**Gürültü eşlenikli sıcaklık farkı (NETD):** NETD termal görüntüleme sistemlerinin hassasiyet parametresidir. Örneğin 30 mK NETD değerine sahip bir termal kamera ortamdaki 30 mK sıcaklık değişimlerini algılayabilir. Ancak daha küçük sıcaklık değişimlerini algılayamaz. Birim sinyal-gürültü oranına karşılık gelen minimum sıcaklık farkıdır. NETD değerinin küçük olması bir avantajdır. Foton dedektörlerinde NETD değeri 10-30 mK aralığında iken, termal dedektörlerde 30-120 mK aralığındadır. NETD eşitlik 2.23'de gösterilmiştir [80].

$$NETD = \frac{V_{n(rms)}}{V_{s(p-p)}} \Delta T = \frac{4(F/\#)^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{A_D} \int T(\lambda) D^*(\lambda) \frac{dM_\lambda}{dT} d(\lambda)} (K) \quad (2.23)$$

### 2.3. Bulanık C-Ortalama Algoritması (FCM-Fuzzy C-Means) ile Görüntü Segmentasyonu

Bulanık C-Ortalama algoritması görüntü segmentasyonlarında (bölütme veya kümeleme) sıklıkla kullanılan ve en çok bilinen tekniklerden birisidir. FCM algoritması 1973'de Dunn tarafından oluşturulmuştur [81]. Daha sonra 1981 yılında Bezdek tarafından geliştirilmiştir [82,83]. FCM algoritması amaç fonksiyonu içeren, iki ya da daha fazla küme veya segment oluşturmak için kullanılan bir algoritmadır. Bu algoritmada her bir veri (görüntüde renklere karşılık gelen RGB veya GRAY renk seviyeleri) 0 ile 1 aralığında bir üyelik değerine sahiptir. Bir verinin oluşturulan tüm kümelere olan üyelik değerlerinin toplamı 1 olmaktadır. Verinin bir kümeye olan üyelik değerinin diğer kümelere olan üyelik değerinden büyük olması, verinin o kümeye ait olduğu anlamına gelmektedir. Amaç fonksiyonunun eşik değere yaklaşması ile kümeleme sona ermektedir. Bulanık C-ortalama algoritmasının amaç fonksiyonu eşitlik 2.24'de gösterilmiştir.

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad 1 \leq m < \infty \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24'te amaç fonksiyonu optimize edilmeye çalışılır. Eşitlikteki  $u_{ij}$ , j'inci kümedeki  $x_i$ 'nin üyelik derecesidir.  $x_i$  ise d boyutlu verinin i'inci elemanıdır.  $C_j$  j kümesinin merkezidir. Başlangıçta  $u_{ij}$  üyelik matrisi ve küme merkezi rastgele atanarak algoritma çalıştırılır. Daha sonra eşitlik 2.25 kullanılarak merkez vektörleri hesaplanır.

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (2.25)$$

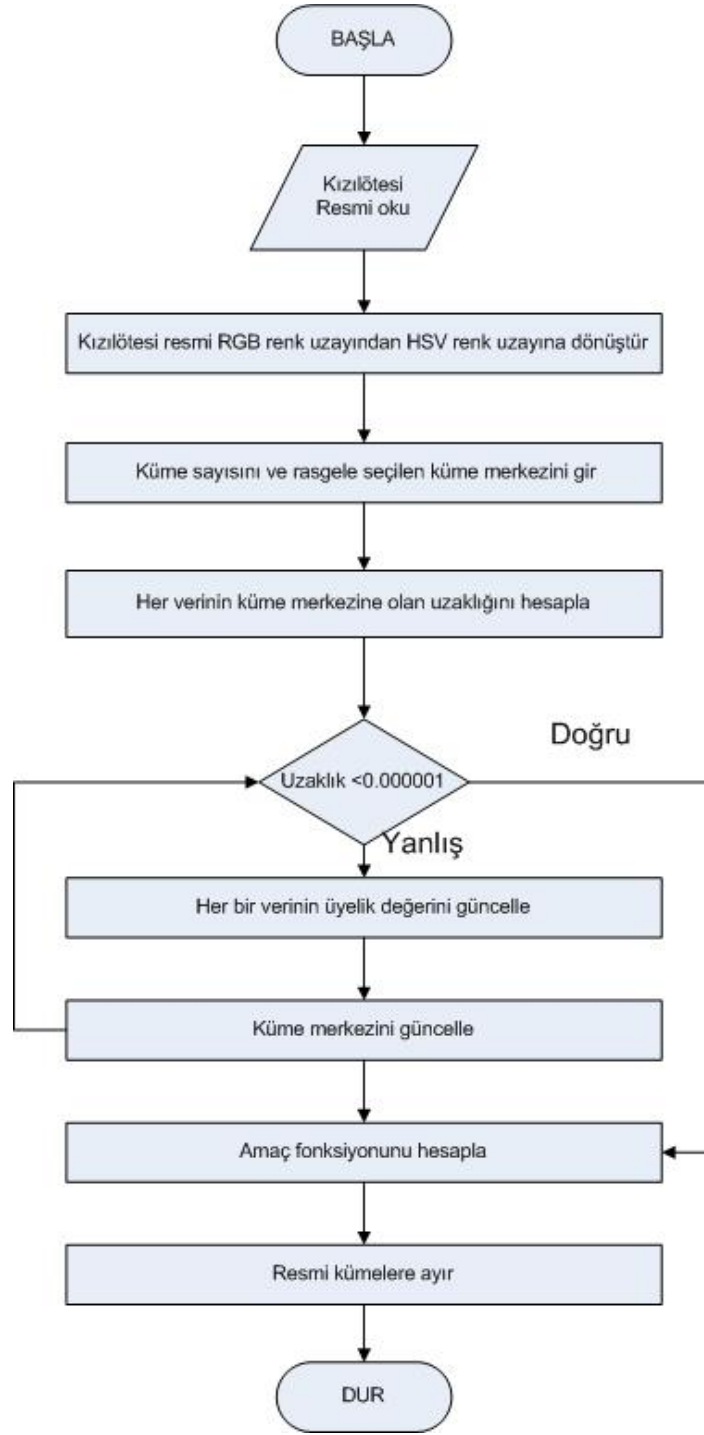
Eşitlik 2.24 ile hesaplanan küme merkezleri eşitlik 2.26 kullanılarak yeniden belirlenmektedir.

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left( \frac{\|x_i - c_i\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{2/(m-1)}} \quad (2.26)$$

Daha önce hesaplanan U matrisleri ile yeni hesaplanan U matrisleri karşılaştırılır. Algoritma eşitlik 2.27 sağlanıncaya kadar devam eder ve sağlanınca sonlanır.

$$\sum_{i=1}^C \|u_{ij}^{(k+1)} - u_{ij}^k\| < \varepsilon \quad (2.27)$$

Bulanık C-Ortalama algoritmasına ait Akış Diyagramı Şekil 2.18' de gösterilmiştir.



**Şekil 2.18.** FCM Algoritması Akış Diyagramı



## 2.4. Beklenti Maksimizasyonu (Expectation Maximization) Algoritması ile Görüntü segmentasyonu

Görüntü segmentasyon yöntemlerinden birisi de EM algoritmasıdır. Bu algoritma ile görüntü segmentasyonu yapılırken istatistiksel bir yaklaşım uygulanır. Bu algoritma incelenmek istenen verinin yerel maksimum olasılığını bulmak için kullanılır. İteratif bir yapıya sahiptir. Maksimum olasılık hesabı Gauss Karışım Model (GMM-Gaussian Mixture Model) ile modellenerek yapılır. Bir verinin Gauss karışım yoğunluk fonksiyonu eşitlik 2.28'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$P(X, \theta) = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot P_i(X, \theta_i) \quad (2.28)$$

Eşitlik 2.28'deki  $X=[X_1, X_2, \dots, X_s]$  s boyutlu rastgele değişken bir vektör; s, veri histogramının gri seviyedeki maksimum değeri;  $\alpha_i$ , verinin her bir bileşenin ağırlıkları;  $\theta_i = \{\mu_i, \sigma_i\}$   $\mu_i$ , GMM'deki ortalama değer,  $\sigma_i$  ise standart sapma;  $P_i$  ise GMM'deki dağılım fonksiyonudur ve eşitlik 2.29'da gösterilmiştir.

$$P_i(X, \theta_i) = \left( \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \right) \exp \left\{ -\frac{\|x - \mu_i\|^2}{2\sigma_i^2} \right\} \quad (2.29)$$

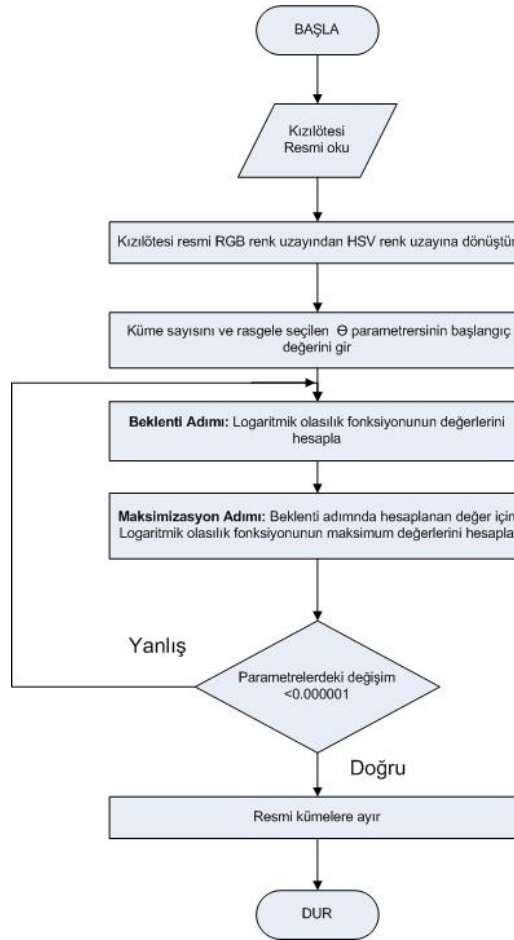
İki adımdan oluşan bir algoritmadır. Birinci adım beklenti adımı, ikinci adım ise maksimizasyon adımıdır. Beklenti adımında ilk olarak olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturulur.  $P(X, Y / \theta)$ , olasılık yoğunluk fonksiyonudur. X, giriş verilerini, Y ise hesaplanmamış veya eksik verileri ifade eder. Olasılık yoğunluk fonksiyonu oluşturulduktan sonra logaritmik olasılık fonksiyonu elde edilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu,  $L(\theta)$  ile gösterilir. Her bir veri için  $\theta$  parametresi, t'inci iterasyona kadar devam ettirilir. Verinin tamamına ait olasılık fonksiyonlarının beklenen değerleri eşitlik 2.30 ile hesaplanır.

$$\Phi(\theta / \theta^{(t)}) = E_{Y/X, \theta^{(t)}} [\log L(\theta; X, Y)] \quad (2.30)$$

Daha sonra beklenti adımında bulunan her bir  $\theta$  parametresi için eşitlik 2.31 ile maksimum değerler hesaplanır.

$$\theta^{(t+1)} = \arg_{\theta} \max \Phi(\theta / \theta^{(t)}) \quad (2.31)$$

Bu işlem hesaplanan parametrelerdeki meydana gelen değişimlerin sona ermesine kadar devam eder. Hesaplanan logaritmik benzerlik fonksiyonuna göre giriş verilerinden çıkış verileri elde edilir. Elde edilen çıkış verileri ilgili kümelere dâhil edilir. Böylece görüntü segmentasyon (bölütleme) işlemi tamamlanmış olur. EM Algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 2.19'da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. EM Algoritması akış diyagramı

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tezde cep telefonu ışımalarının kulak ve etrafındaki dokular tarafından emilimi sonucunda meydana gelen ısı etkileri incelenmiş ve analiz edilmiştir. Analiz üç yöntemle yapılmıştır: Termal görüntüleme tekniği, FCM ve EM. Yapılan çalışmalar şunlardır;

- i. 900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun sebep olduğu termal etkinin üç yöntemle analizi,
- ii. 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun sebep olduğu termal etkinin üç yöntemle analizi,
- iii. 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun sebep olduğu termal etkinin üç yöntemle analizi,
- iv. 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla kullanımı sonucunda 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun sebep olduğu termal etkinin üç yöntemle analizi.

Bu deneysel çalışmalar sıcaklık kontrollü bir odada ve sağlıklı bireyler istihdam edilerek gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı sürekli Şekil 3.1'de gösterilen termometre ile ölçülmüştür.



**Şekil 3.1.**Ortam sıcaklığının ölçümünde kullanılan termometre

Çalışmada Flir firmasına ait ThermaCAM SC640 termal kamera kullanılmıştır. Şekil 3.2'de çalışmada kullanılan termal kamera gösterilmiştir. Termal kameranın bazı önemli özellikleri şunlardır;

- Çözünürlüğü, 640x480 piksel,
- Dedektör tipi, soğutmasız mikrobolometre,
- NETD, 60 mK (60 mK'lik sıcaklık değişimlerini algılayabilme özelliği),
- Çalışma dalga boyu aralığı 7,5  $\mu\text{m}$  – 13  $\mu\text{m}$ .



**Şekil 3.2.** Flir SC640 Termal kamera

Çalışmada farklı SAR değerlerine sahip iki cep telefonu kullanılmıştır. Kullanılan cep telefonlarının SAR değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Günümüzde kullanılan bazı cep telefonu modellerinin SAR değerleri EK 1'de sunulmuştur [84].

**Çizelge 3.1.**Çalışmada kullanılan cep telefonları ve SAR değerleri [84]

<b>Cep Telefonu Modeli</b>	<b>SAR Değeri</b>
Samsung GT-C3510	0,793 W/kg
Samsung Galaxy W I8150	0,52 W/kg

Çalışma sırasında termal kamera cep telefonu konuşması yapanların sağ baş kısmına odaklanmıştır. Konuşmacının yakın çevresinde ısı yayan herhangi bir ısı kaynağı bulunmamaktadır. Sıcaklık kontrollü bir odada çalışma yapılmıştır. Konuşmacı ile termal kamera arasında 2 metre mesafe bulunmaktadır. Konuşan kişinin sol tarafında herhangi bir ısı kaynağı bulunmayan bir duvar vardır. Duvar ile konuşan kişi arasındaki mesafe 1 metredir. Cep telefonu çalışma sırasında sağ eldedir. Konuşmada sağ kulak kullanılmıştır. Konuşma sırasında konuşmacı her 10 dakikada bir defa kısa bir süre cep telefonunu kulağından uzaklaştırmış, termal kamera ile termal görüntü çekildikten sonra tekrar konuşmaya devam etmiştir. Cep telefonu konuşması normal bir konuşma sürecinde devam etmiş, yani sürekli karşı tarafı dinleme veya sürekli konuşma olmamıştır. Günlük hayattaki konuşmalara benzetilmiştir. Konuşma sırasında cep telefonu kulağa dokundurulmamış veya kulaktan çok uzak bir mesafede tutulmamış, kulağa yakın bir mesafede günlük konuşma şekli ile tutulmuştur. Konuşma 50 dakika boyunca devam etmiştir. Çalışma sırasında alınan bir resim Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

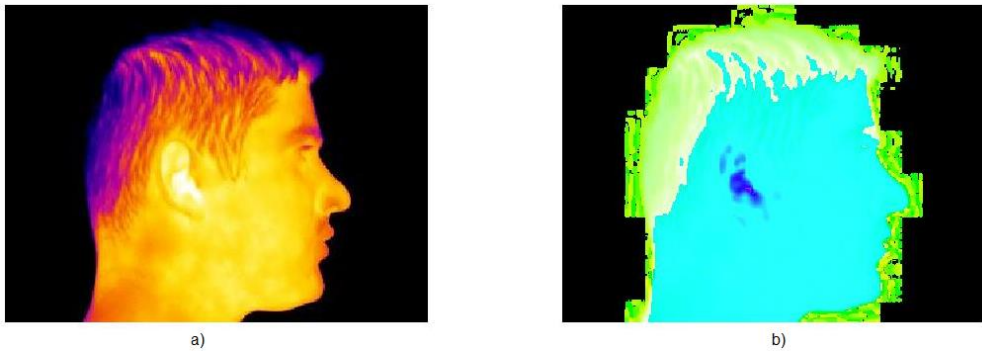


**Şekil 3.3.** Çalışma sırasında alınan bir resim

### 3.1. Bulanık C-Ortalama ve Beklenti Maksimizasyonu ile Elde Edilen Araştırma Bulguları

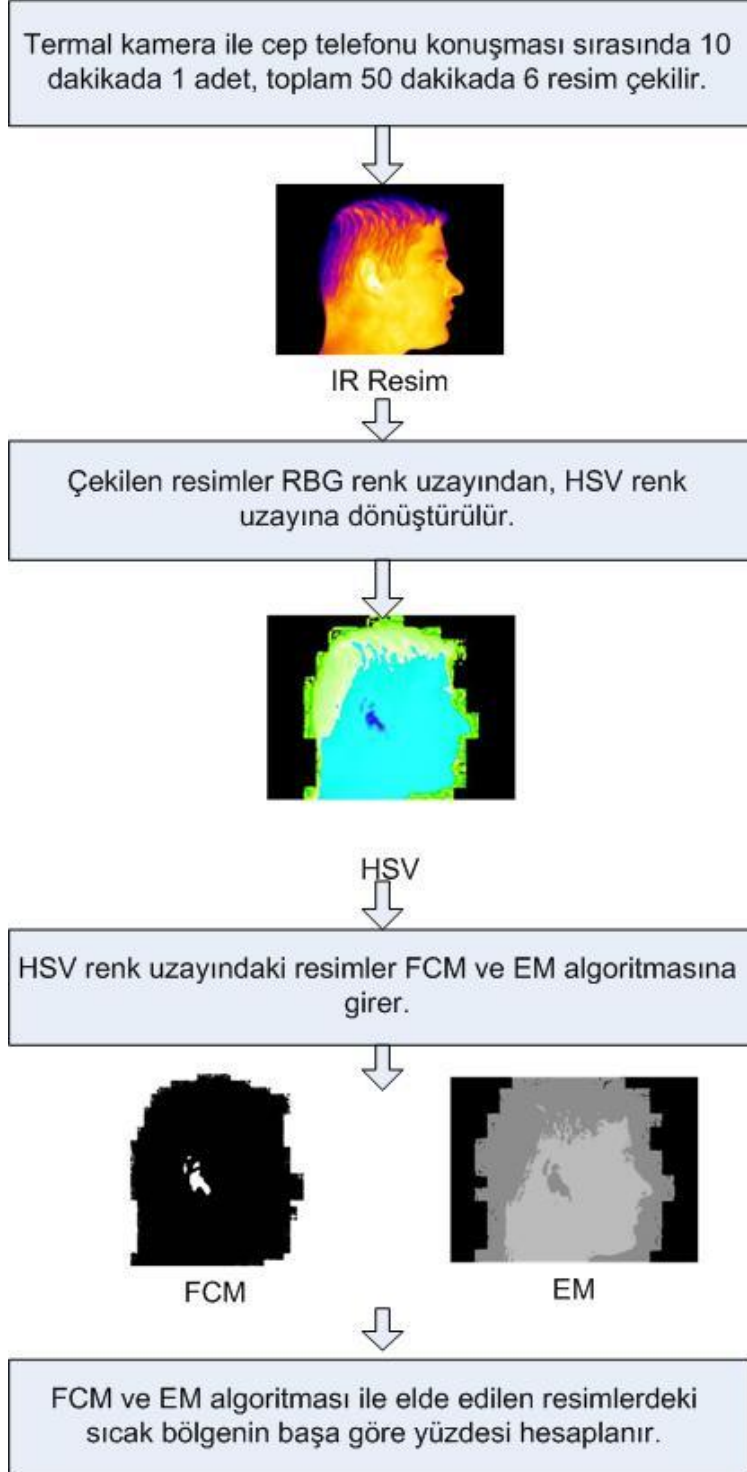
Termal kamera ile cep telefonu konuşması sırasında çekilen resimler Bulanık C-Ortalama ve Beklenti Maksimizasyonu ile segmentasyon yapılarak, kulak ve etrafındaki sıcak bölgeler tespit edilmiştir. Termal resimler FCM ve EM algoritmalarına girmeden önce algoritmaların daha verimli çalışabilmesi, performansının artırılması amacıyla bazı işlemlere tabi tutulmuştur. Bu bölümdeki işlemler Matlab R2013b yazılımında gerçekleştirilmiştir. Matlab de yazılan kodlarla FCM ve EM algoritmaları oluşturulmuş ve çalıştırılmıştır.

Bütün renkler, ana renkler olan kırmızı, yeşil ve mavi renk kodlarına sahiptir. Termal resimlerde RGB uzayında değerlere sahiptir. Termal resimler ilk olarak RGB (Red, Green, Blue) uzayından HSV (Hue, Saturation, Value) uzayına dönüştürülmüştür. HSV uzayındaki H renk tonunu, S doyumu ve V değer veya şiddet anlamına gelmektedir. Yani HSV uzayı, renklerin RGB değerlerini değil, renklerin tonlarını, doyuma ulaşmış değerlerini ve şiddet bilgilerini barındırmaktadır. RGB uzayında HSV uzayına dönüşüm yapılarak termal resmin doyum değerleri elde edilmektedir. Şekil 3.4'te aynı resmin RGB ve HSV uzaylarındaki görüntüleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** a) RGB b) HSV uzayındaki termal resim

Yapılan çalışmada, termal kamera ile görüntü alınmasıyla başlayan, FCM ve EM kullanılarak görüntü bölütlemesi ile veri elde edilmesine kadar devam eden süreç Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. FCM ve EM ile analiz süreci

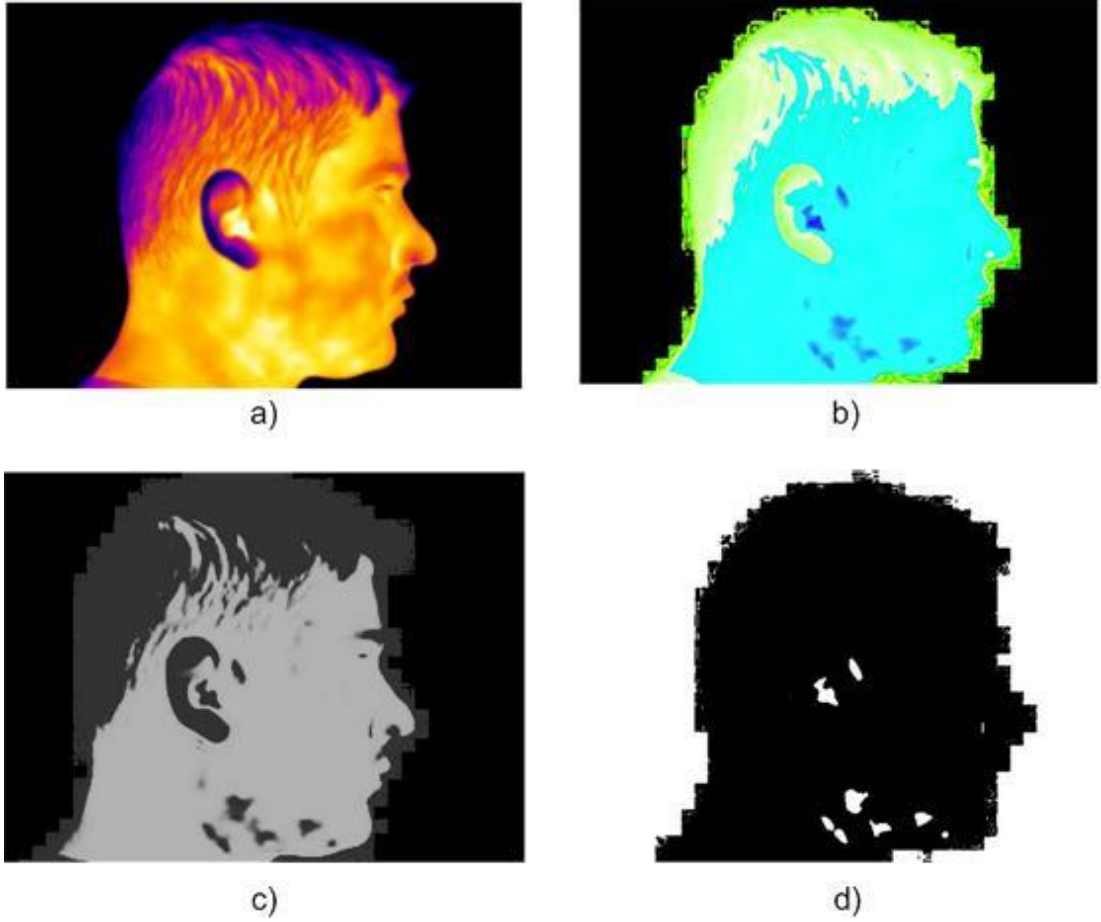
Termal kamera ile elde edilen görüntünün RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülmesi ile elde edilen doyum değerleri FCM ve EM algoritmasına sokulmuş ve görüntü bölütleme yapılmıştır. FCM algoritması kulak ve etrafında bulunan dokudaki sıcaklığı artan bölgenin (sıcak bölge) piksel değerini gri seviyede 255, diğer piksellerin gri seviye değerlerini ise 1'e eşitlemiştir. FCM algoritması ile iki kümeden oluşan ve kümelerin piksel değerleri 1 ve 255 olan yeni görüntü elde edilmiştir. FCM algoritması ile elde edilen yeni görüntüdeki kulak ve etrafındaki 255 değerine sahip pikseller ve başı oluşturan pikseller saydırılmıştır. Sonuçta başın ve kulak bölgesindeki sıcak bölgenin toplam piksel sayılarına ulaşılmıştır. EM algoritması ile resimler 3 farklı gri seviyeye bölütlenmiştir. Elde edilen görüntüde kulak ve etrafında bulunan dokudaki sıcaklığı artan bölgelerin (sıcak bölgeler) ve görüntüdeki başı oluşturan piksel sayıları hesaplanmıştır. FCM ve EM ile elde edilen, sıcak bölgedeki piksel sayılarının, tüm baş bölgesindeki piksel sayısına göre yüzdesi hesaplanmıştır. Böylece sıcak bölgenin, insan başının yüzde kaçını oluşturduğu bilgisine ulaşılmıştır. Bu işlem tüm çalışmalarda, her 10 dakikada bir çekilen resimlerin hepsine uygulanarak, elektromanyetik radyasyona maruz kalan dokudaki sıcak bölgenin artış miktarı hesaplanmıştır.

### **3.1.1. 900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular**

Bu çalışmada cep telefonu 900 MHz'de çalıştırılarak, termal kamera ile 50 dakika boyunca 10 dakikada bir resim çekilmiştir. Çekilen resimler Şekil 3.5'teki süreçten geçirilerek sıcak bölge yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak konuşma başlangıcında çekilen resim daha sonra 10'ar dakika arayla çekilen resimler analiz edilmiştir.

Konuşma başlangıcında çekilen RGB renk uzayındaki, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.6'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.



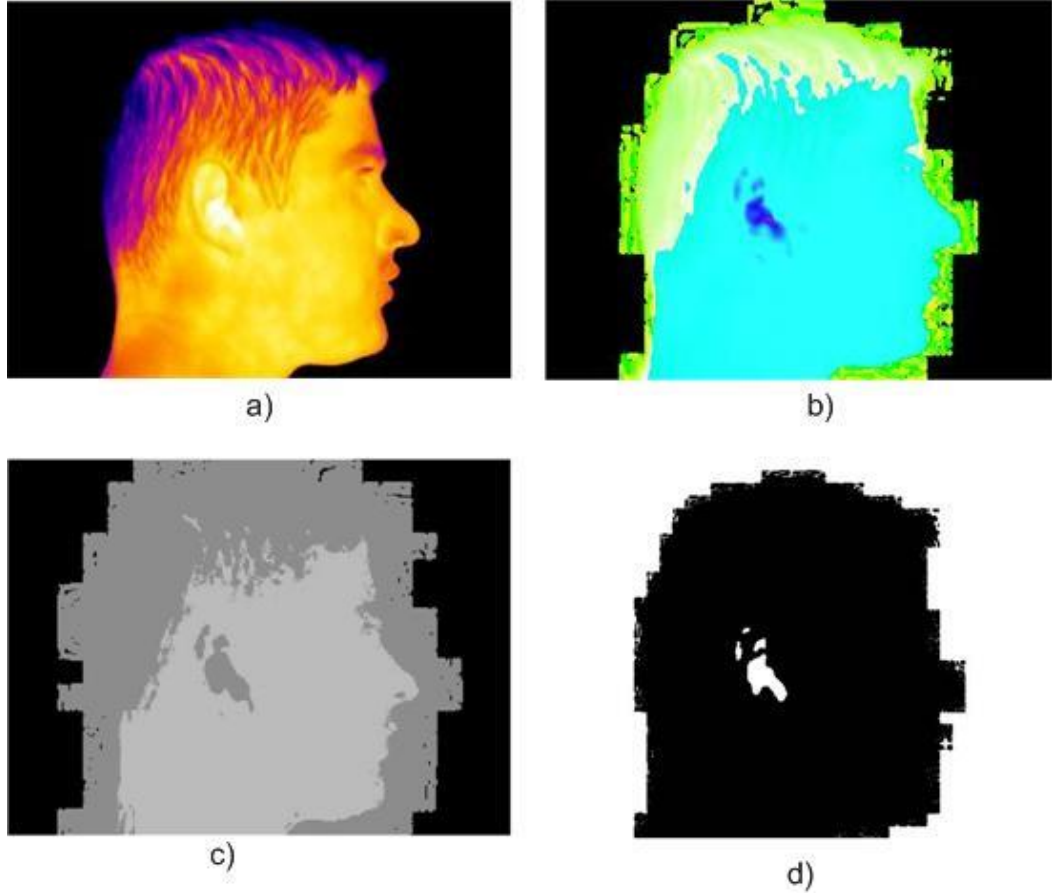


**Şekil 3.6.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.2.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	0	728	163828	0,4444
EM	0	1208	177056	0,6811

Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra çekilen RGB renk uzayındaki, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.7’de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

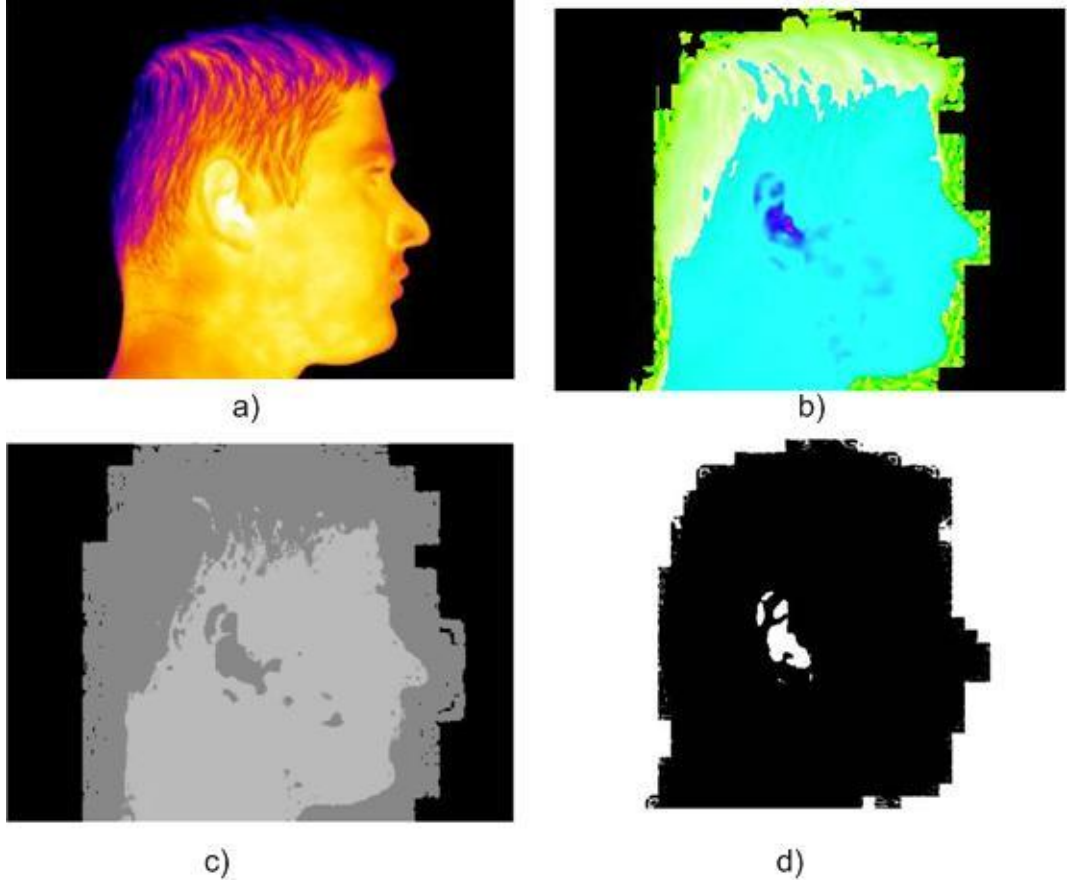


**Şekil 3.7.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonrab) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.3.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	10	1854	162787	1,1389
EM	10	1830	187888	0,974

Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra çekilen RGB renk uzayındaki, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.8'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

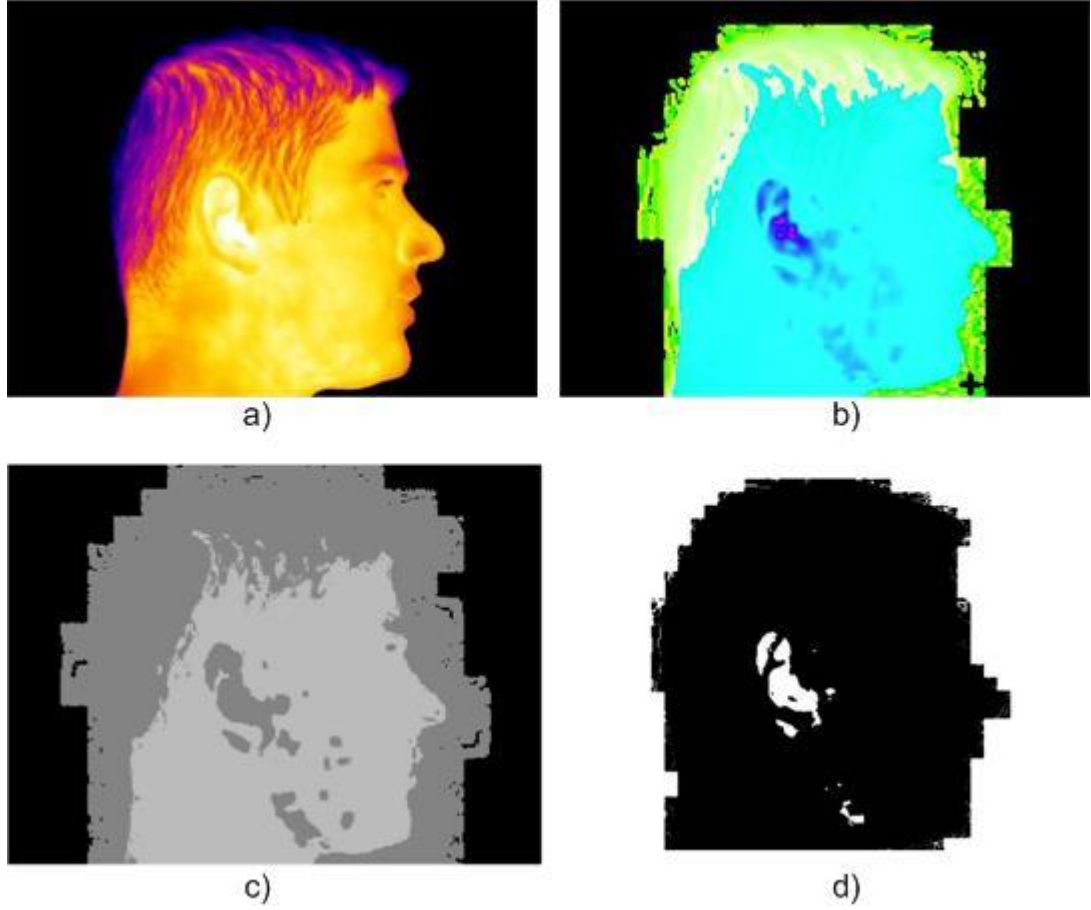


**Şekil 3.8.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.4.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin başa göre yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	20	2480	161691	1,5338
EM	20	2613	181987	1,4358

Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra çekilen RGB renk uzayındaki, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.9'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

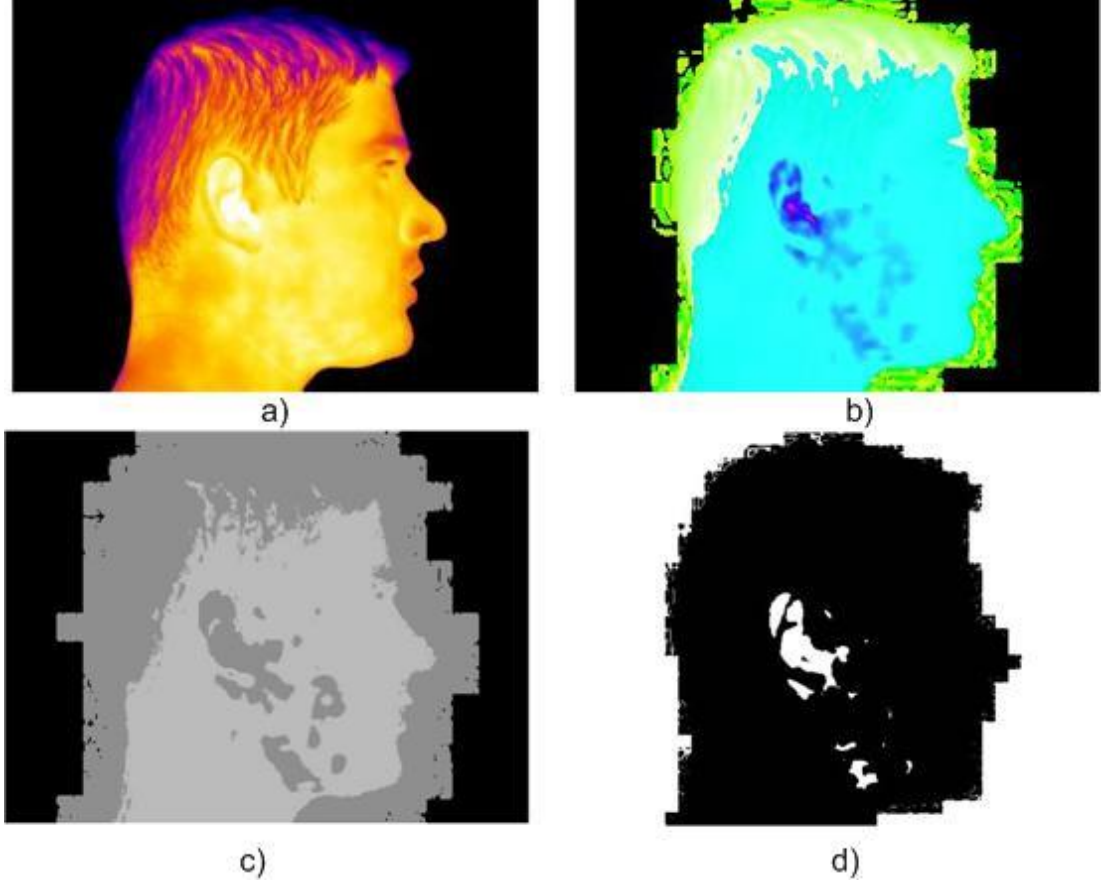


**Şekil 3.9.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonrab) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.5.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	30	3587	160217	2,2388
EM	30	4100	182089	2,2516

Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra çekilen RGB renk uzayındaki, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.10'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

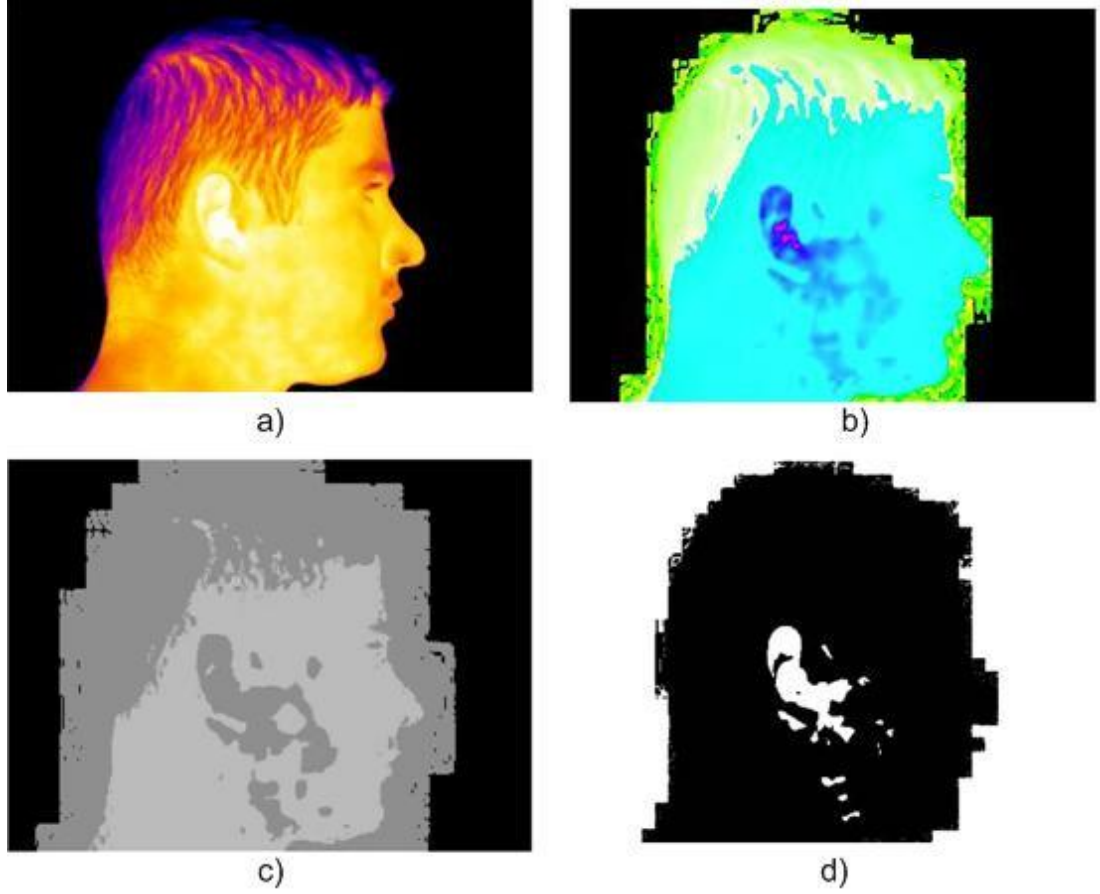


**Şekil 3.10.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.6.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	40	4380	166232	2,6349
EM	40	5111	182452	2,8012

Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.11'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11.** 1. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

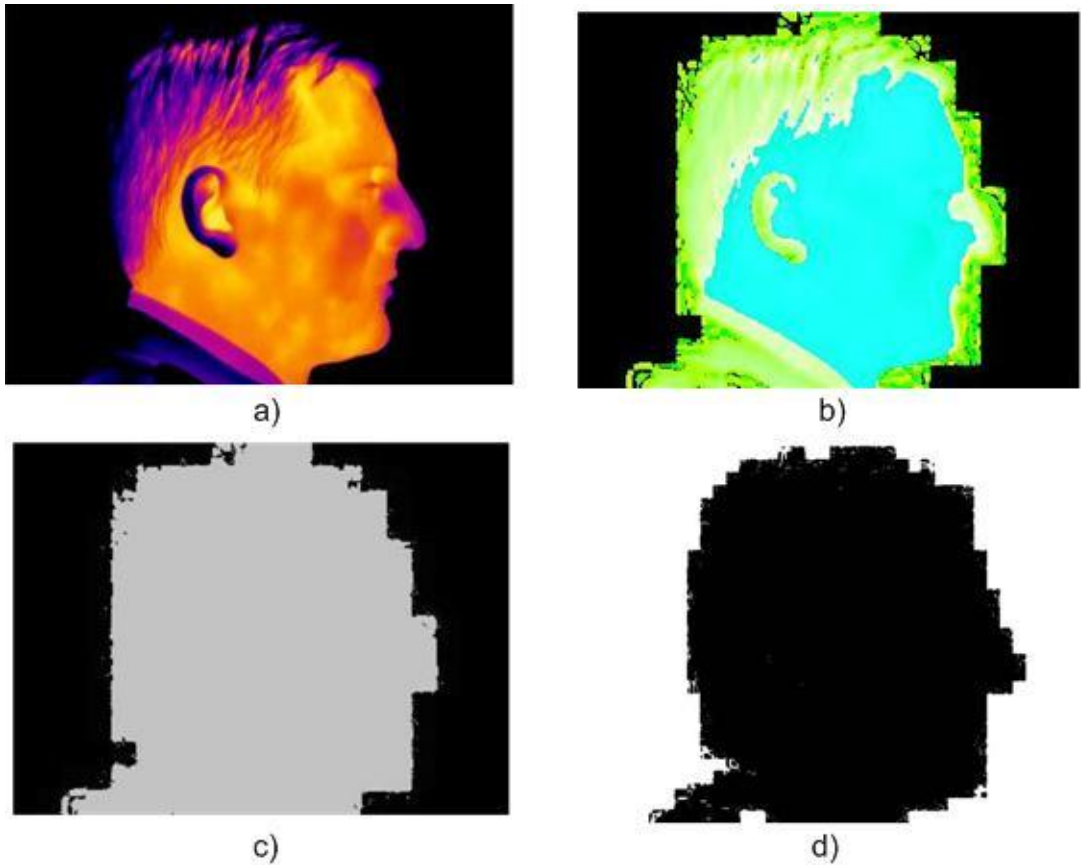
**Çizelge 3.7.** 1. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	50	4792	162302	2,9525
EM	50	6041	177427	3,4047

### 3.1.2. 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular

Bu çalışmada cep telefonu 900 MHz'de çalıştırılarak, termal kamera ile 50 dakika boyunca 10 dakikada bir resim çekilmiştir. Çekilen resimler Şekil 3.5'teki süreçten geçirilerek sıcak bölge yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak konuşma başlangıcında çekilen resim daha sonra 10'ar dakika arayla çekilen resimler analiz edilmiştir.

Konuşma başlangıcında çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.12'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

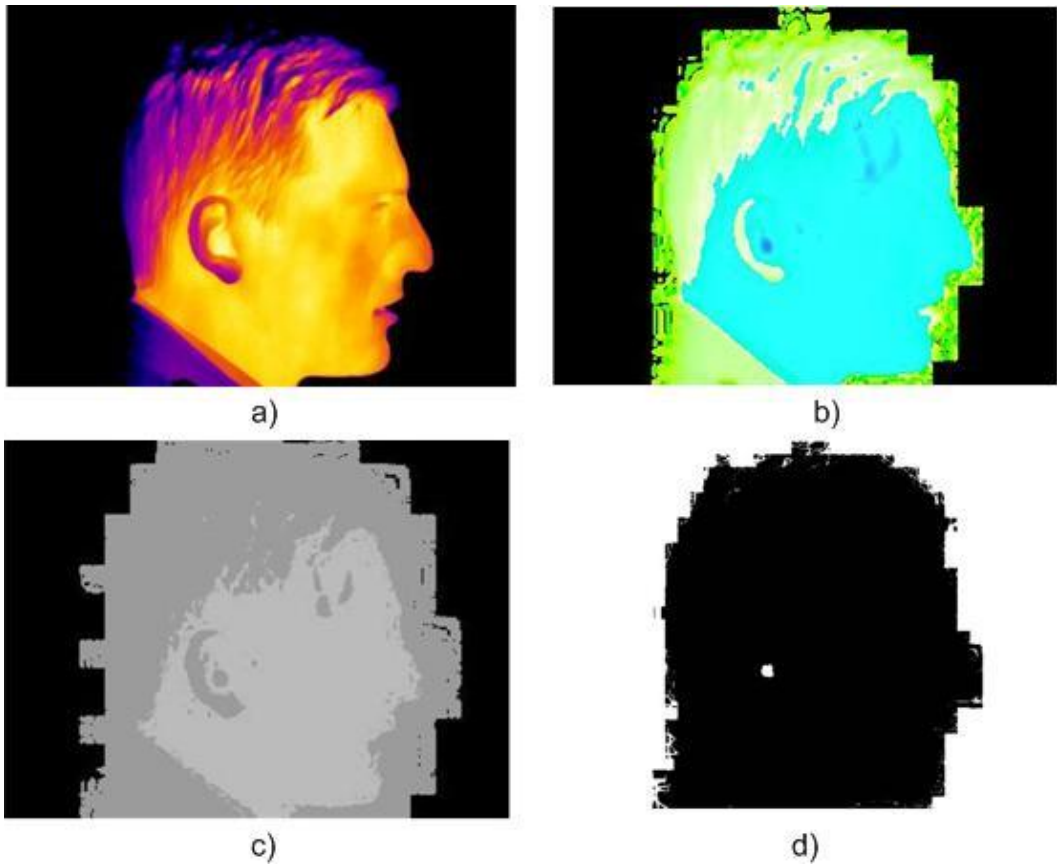


Şekil 3.12. 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.8.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	0	3	159082	0,0019
EM	0	7	176737	0,0039

Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.13'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.



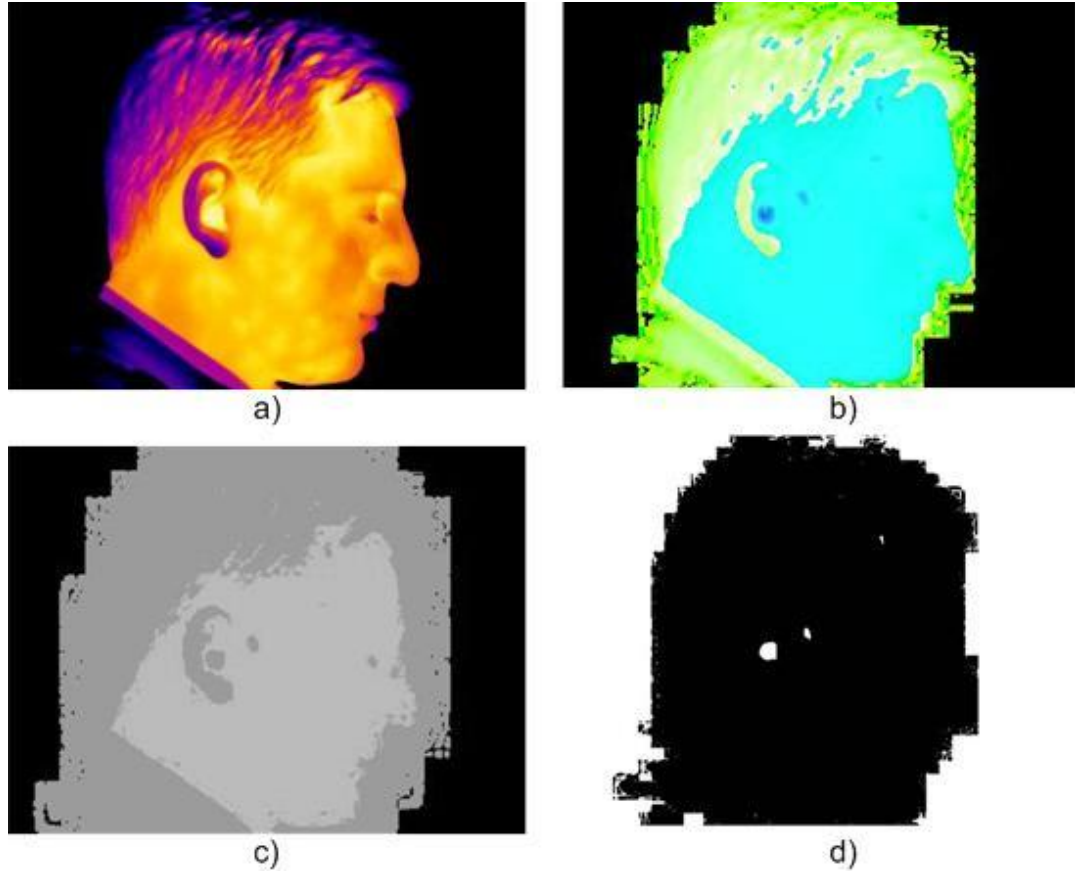
**Şekil 3.13.** 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler



**Çizelge 3.9.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	10	197	157643	0,1250
EM	10	483	200809	0,2405

Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.14'te, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.10'da gösterilmiştir.

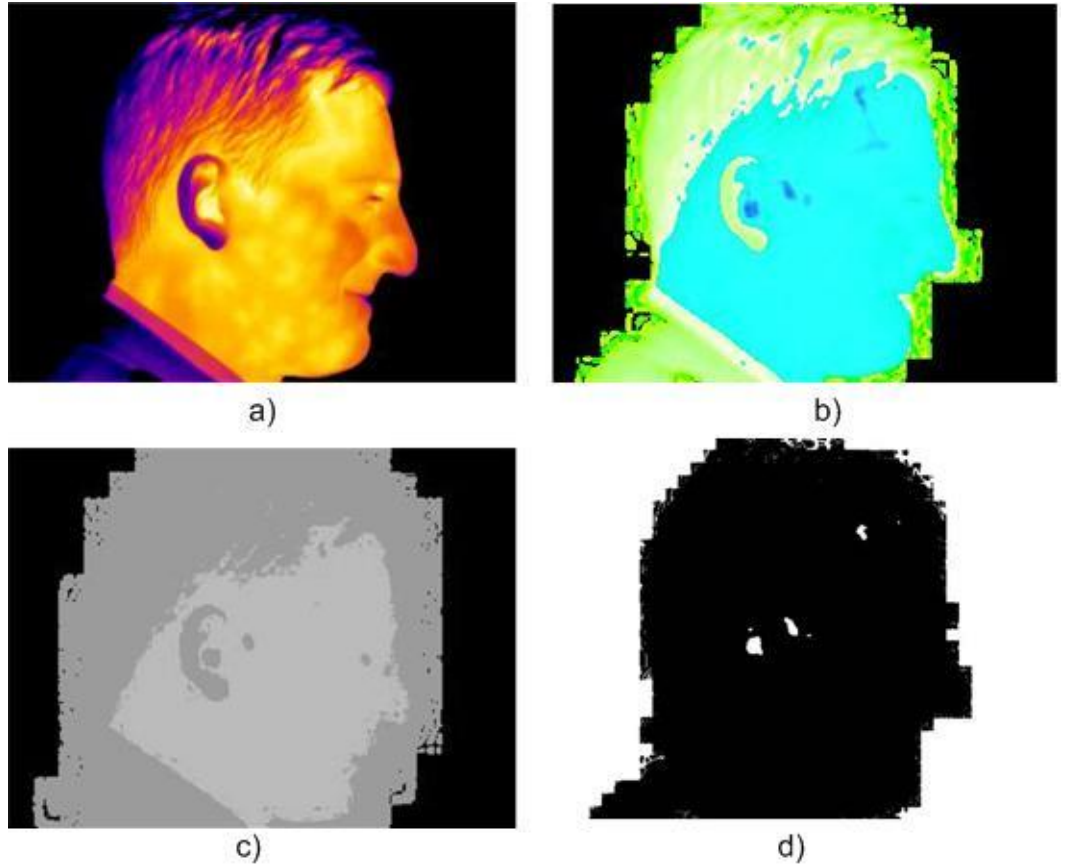


**Şekil 3.14.** 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) FCM Algoritma çıktısı resim

**Çizelge 3.10.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	20	502	171795	0,2022
EM	20	856	219038	0,3907

Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.15'te, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.11'de gösterilmiştir.

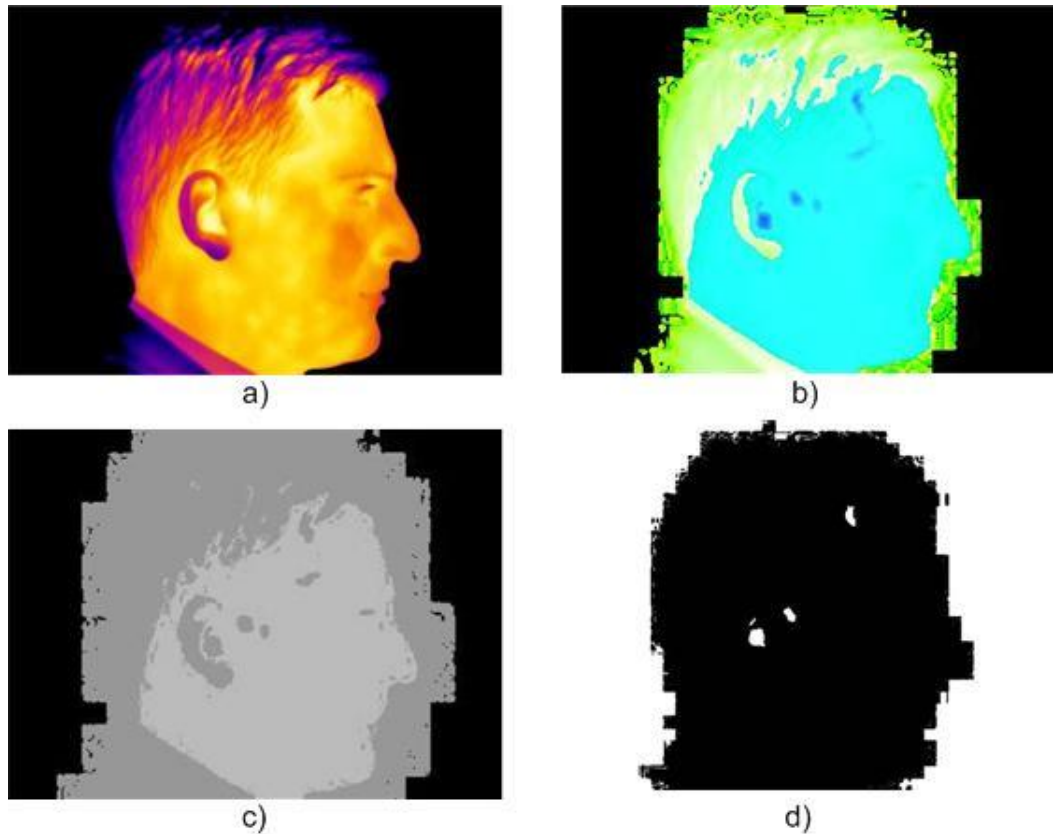


**Şekil 3.15.** 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.11.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	30	751	174126	0,4313
EM	30	927	219979	0,4214

Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.16'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.12'de gösterilmiştir.

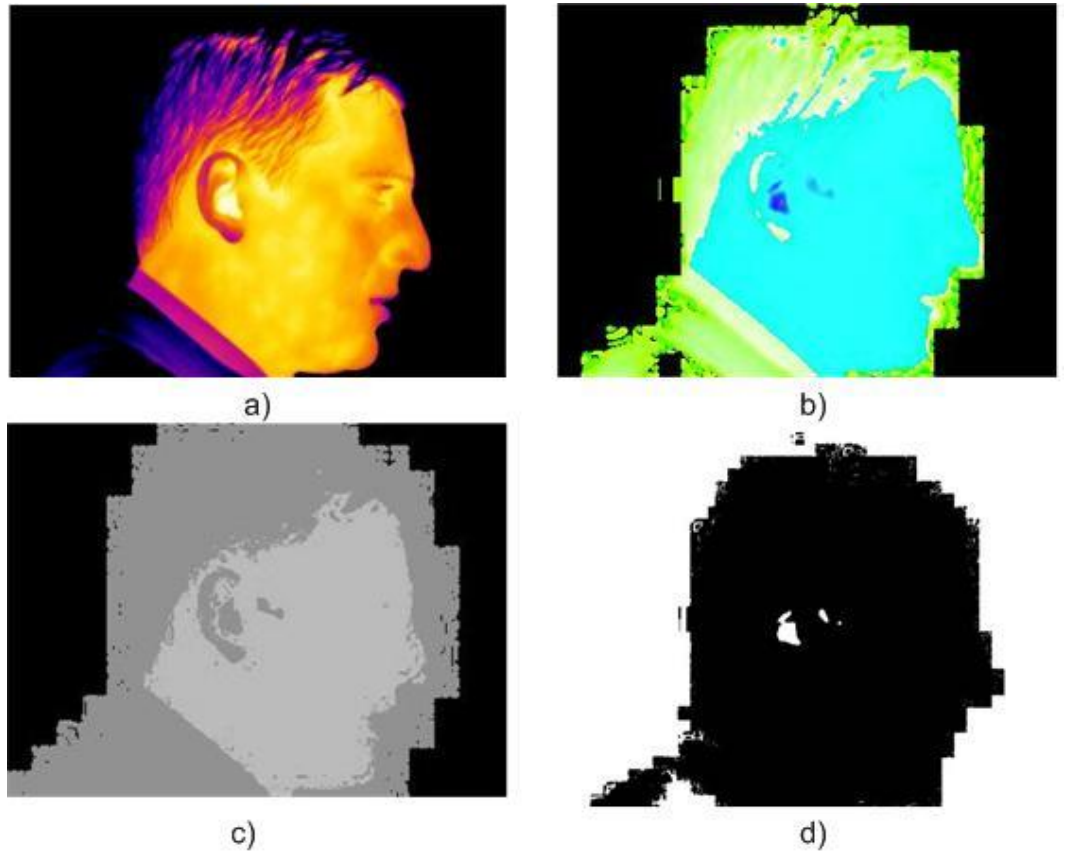


**Şekil 3.16.** 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 40 dakika b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.12.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	40	816	165131	0,4942
EM	40	1212	213093	0,5687

Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.17'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.13'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.17.** 2. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

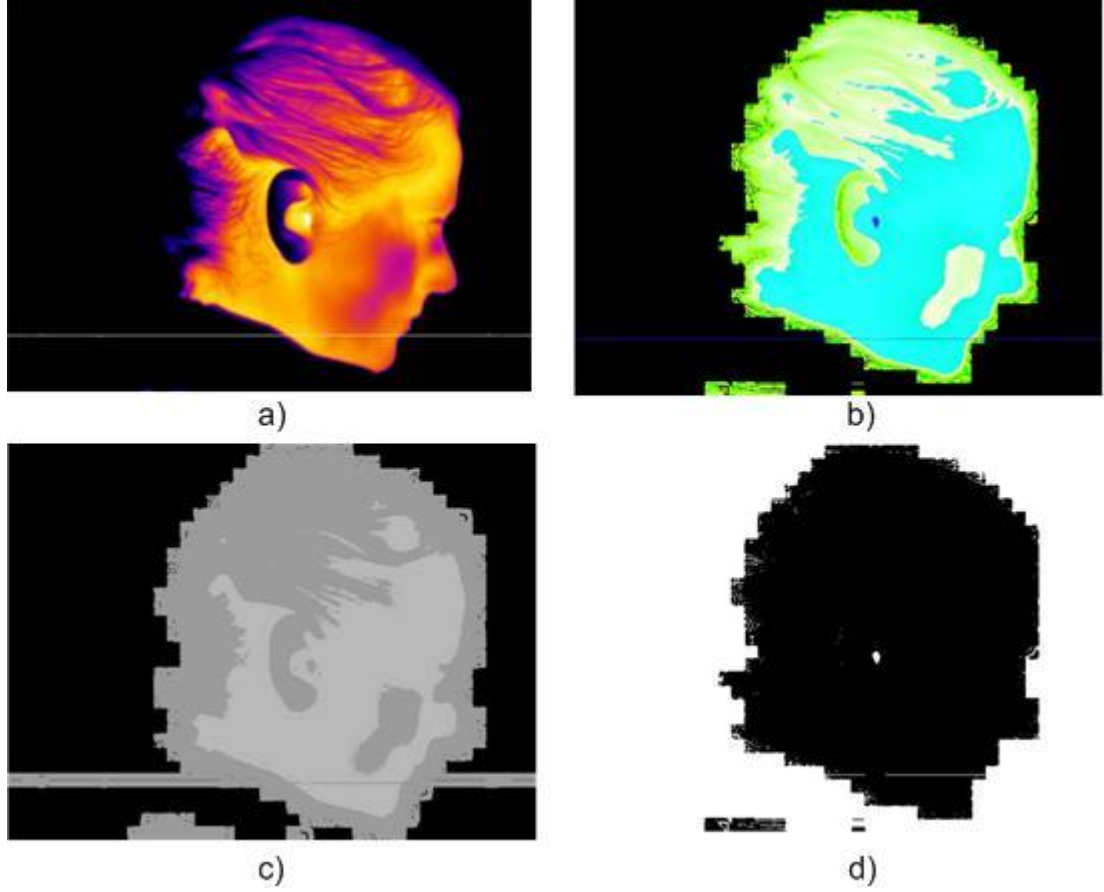
**Çizelge 3.13.** 2. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	50	874	161298	0,5419
EM	50	1795	208708	0,8600

### **3.1.3. 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine Sahip Cep Telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular**

Bu çalışmada cep telefonu 1800 MHz'de çalıştırılarak, termal kamera ile 50 dakika boyunca 10 dakikada bir resim çekilmiştir. Çekilen resimler Şekil 3.5'teki süreçten geçirilerek sıcak bölge yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak konuşma başlangıcında çekilen resim daha sonra 10'ar dakika arayla çekilen resimler analiz edilmiştir.

Konuşma başlangıcında çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.18'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.14'te gösterilmiştir.

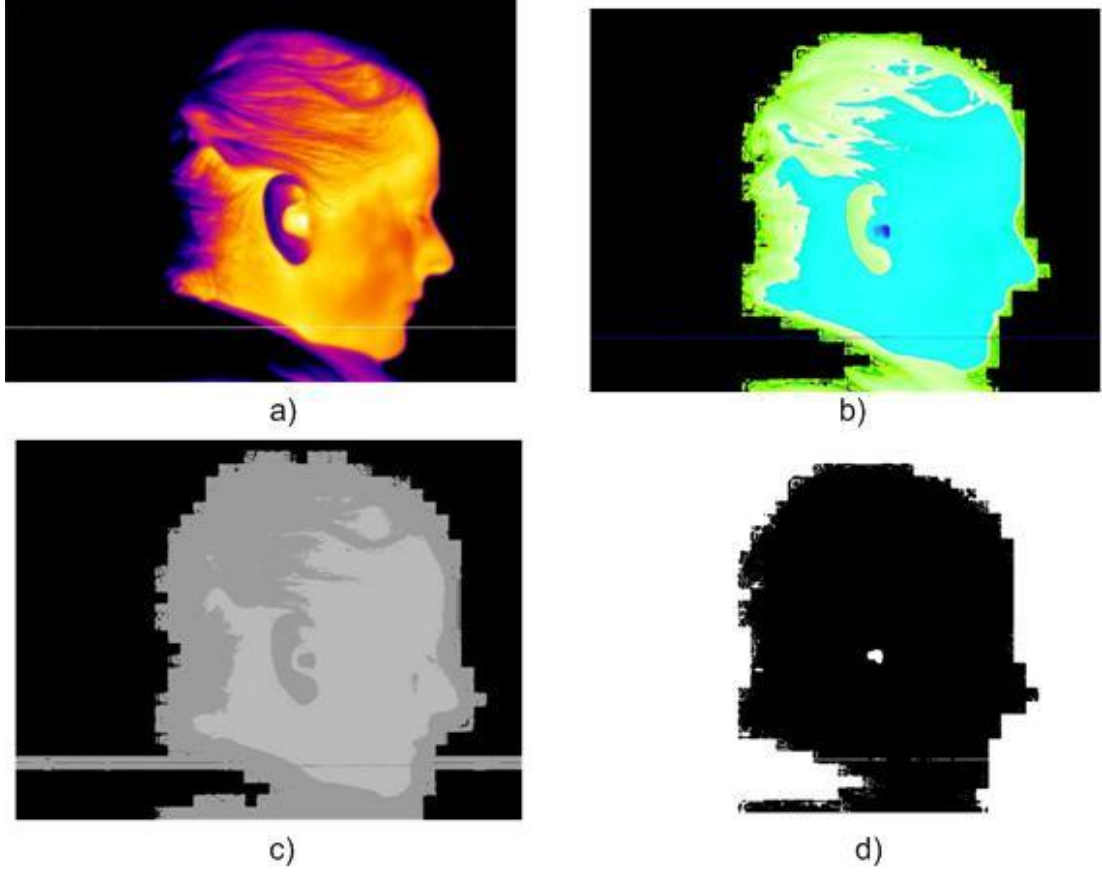


**Şekil 3.18.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.14.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	0	96	123242	0,0779
EM	0	167	138602	0,1204

Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.19'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.15'te gösterilmiştir.

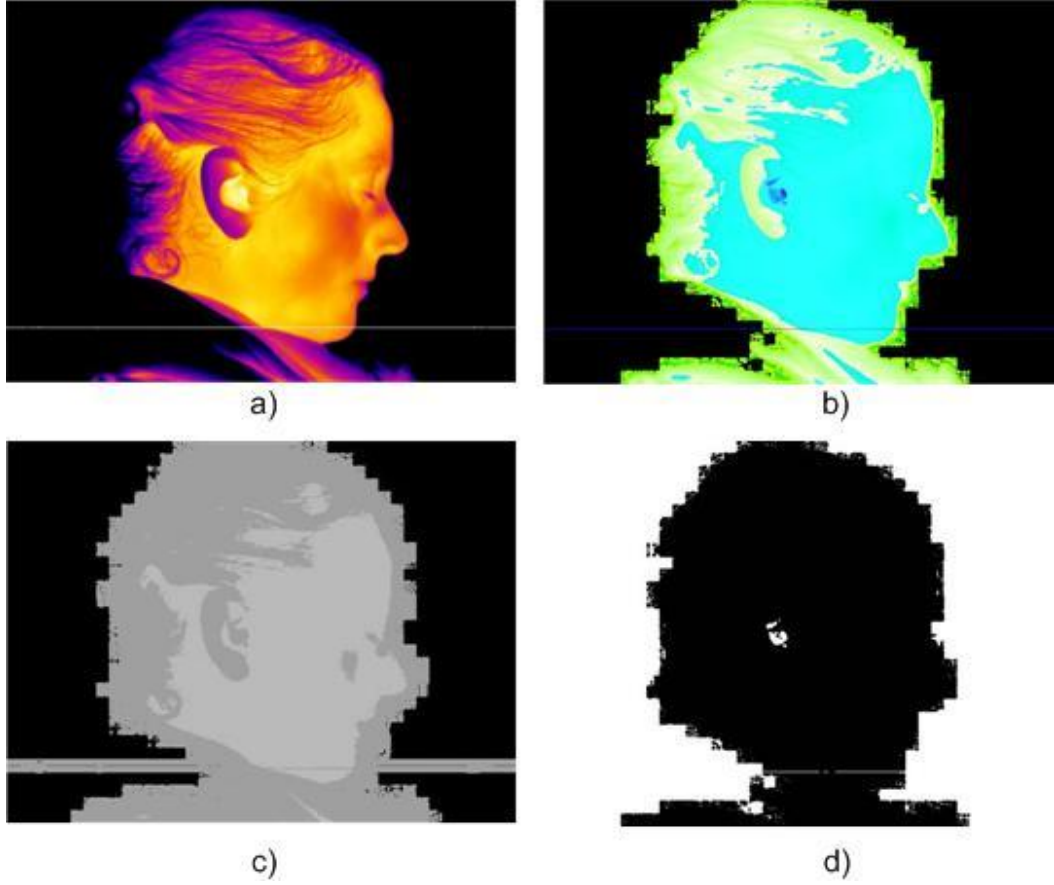


**Şekil 3.19.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.15.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	10	255	120809	0,2111
EM	10	376	134277	0,2800

Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.20'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.16'da gösterilmiştir.



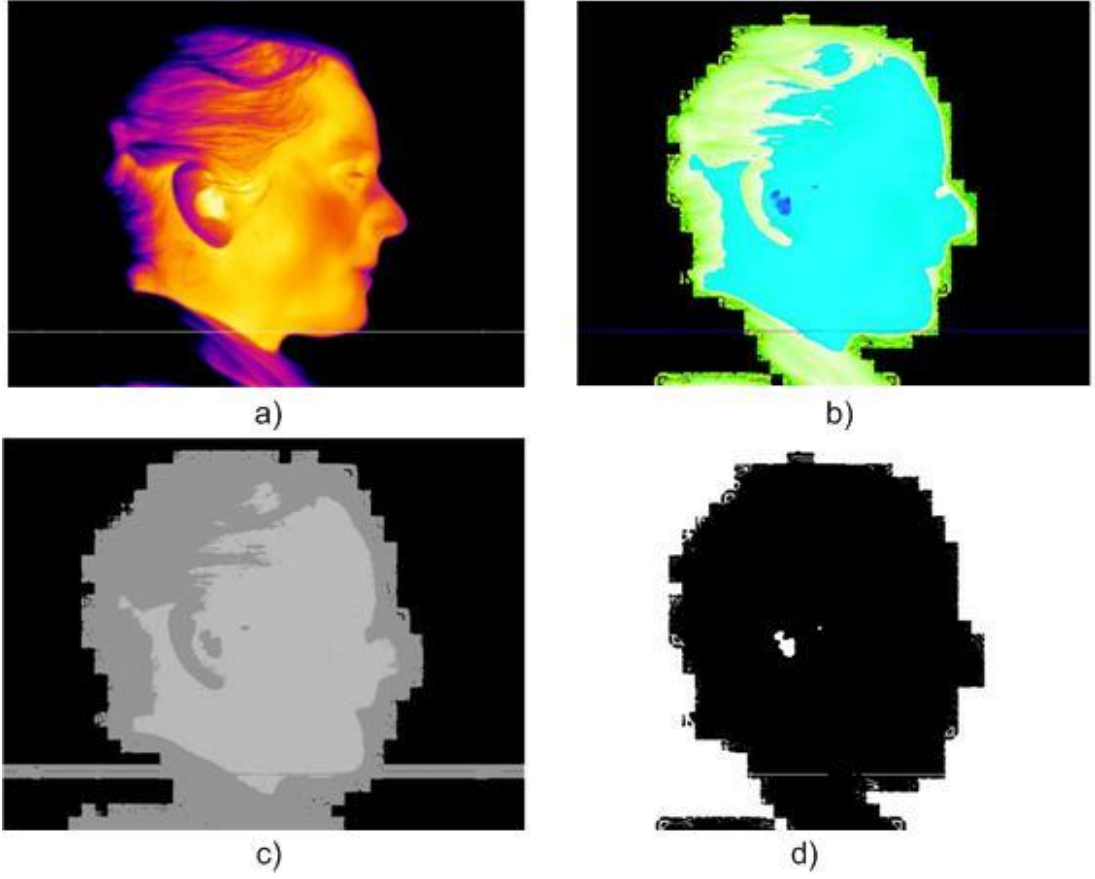
**Şekil 3.20.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.16.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 20 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	20	346	128252	0,2698
EM	20	648	141213	0,4588

Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.21’de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.17’de gösterilmiştir.



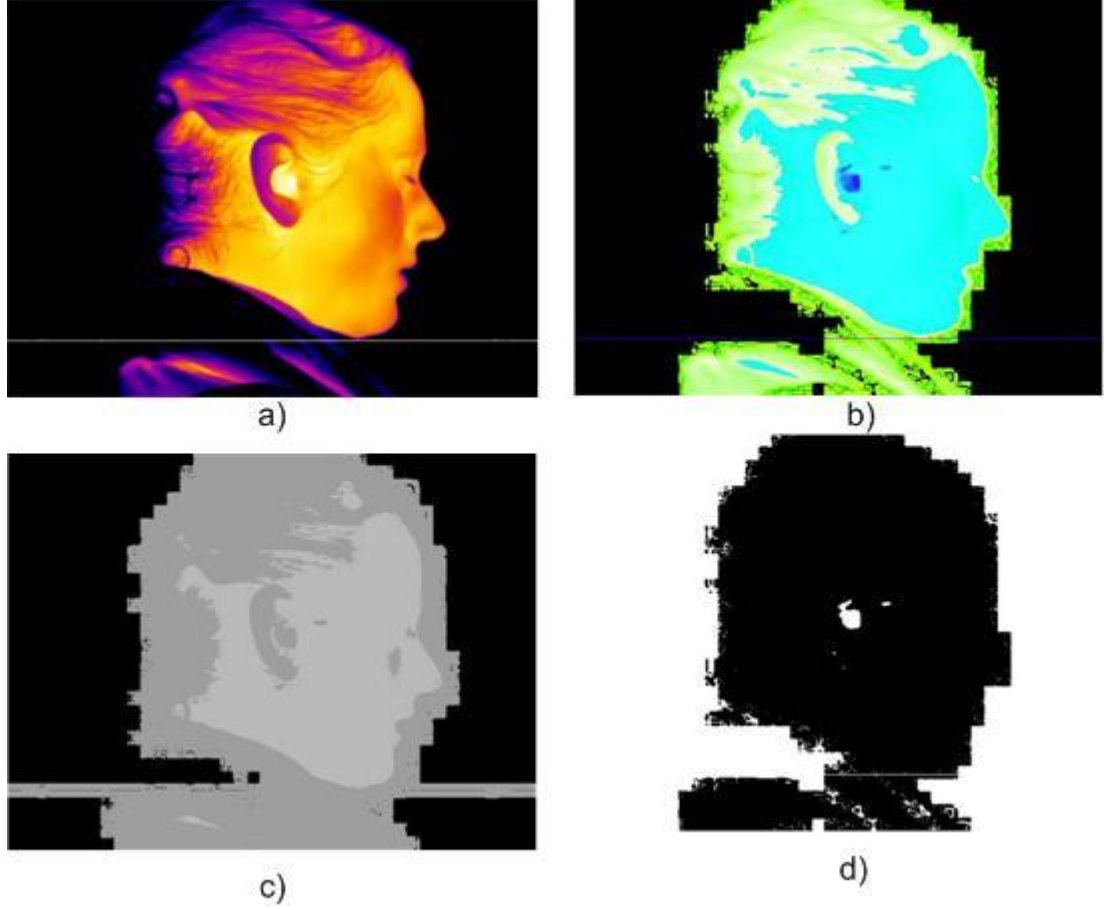


**Şekil 3.21.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.17.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 30 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin başa göre yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	30	461	120533	0,3825
EM	30	738	134352	0,5493

Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.22’de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.18’de gösterilmiştir.

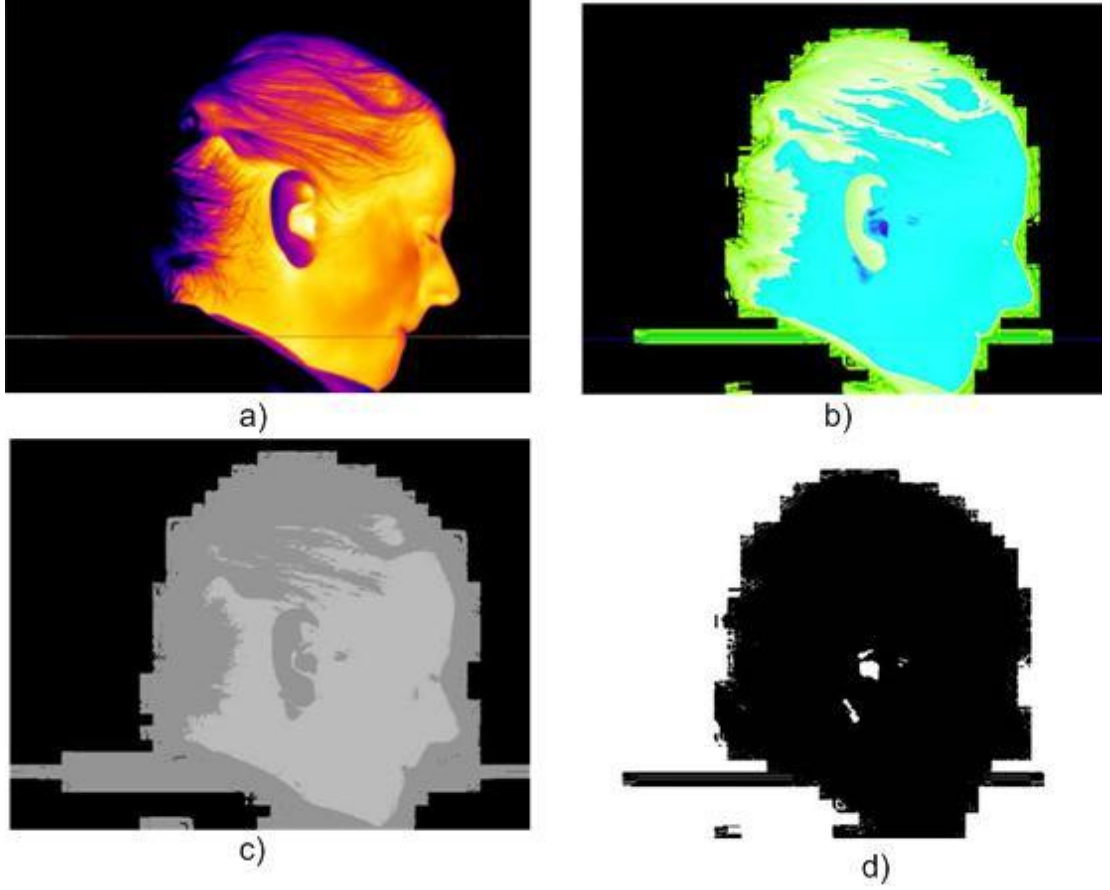


**Şekil 3.22.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.18.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 40 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	40	588	123066	0,4778
EM	40	791	137859	0,5737

Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.23'te, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.23.** 3. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

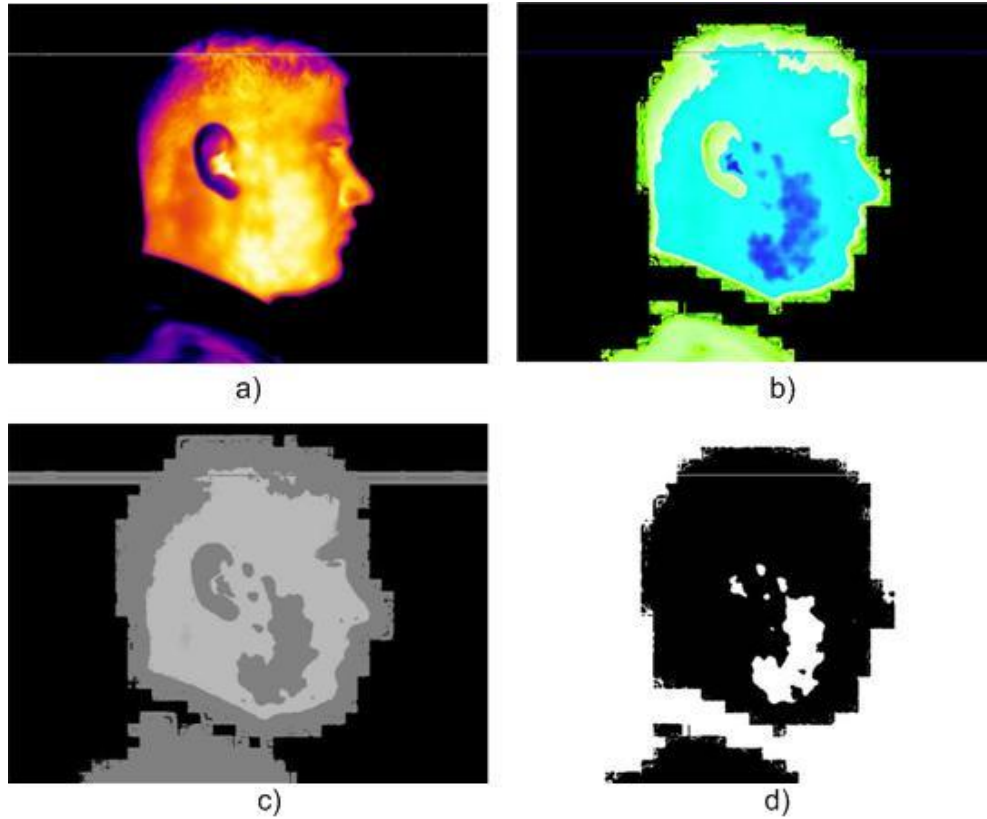
**Çizelge 3.19.** 3. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	50	725	123967	0,5849
EM	50	913	137160	0,6656

### 3.1.4. 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla kullanımı sonucunda (Mixed Effect) 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile Yapılan Çalışmada FCM ve EM ile Elde Edilen Bulgular

Bu çalışmada cep telefonu sırası ile 25 dakika 900 MHz, 25 dakika 1800 MHz frekanslarda çalıştırılarak, termal kamera ile 50 dakika boyunca 10 dakikada bir resim çekilmiştir. Çekilen resimler Şekil 3.5'teki süreçten geçirilerek sıcak bölge yüzdeleri hesaplanmıştır. İlk olarak konuşma başlangıcında çekilen resim daha sonra 10'ar dakika arayla çekilen resimler analiz edilmiştir.

Konuşma başlangıcında çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.24'te, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.20'de gösterilmiştir.

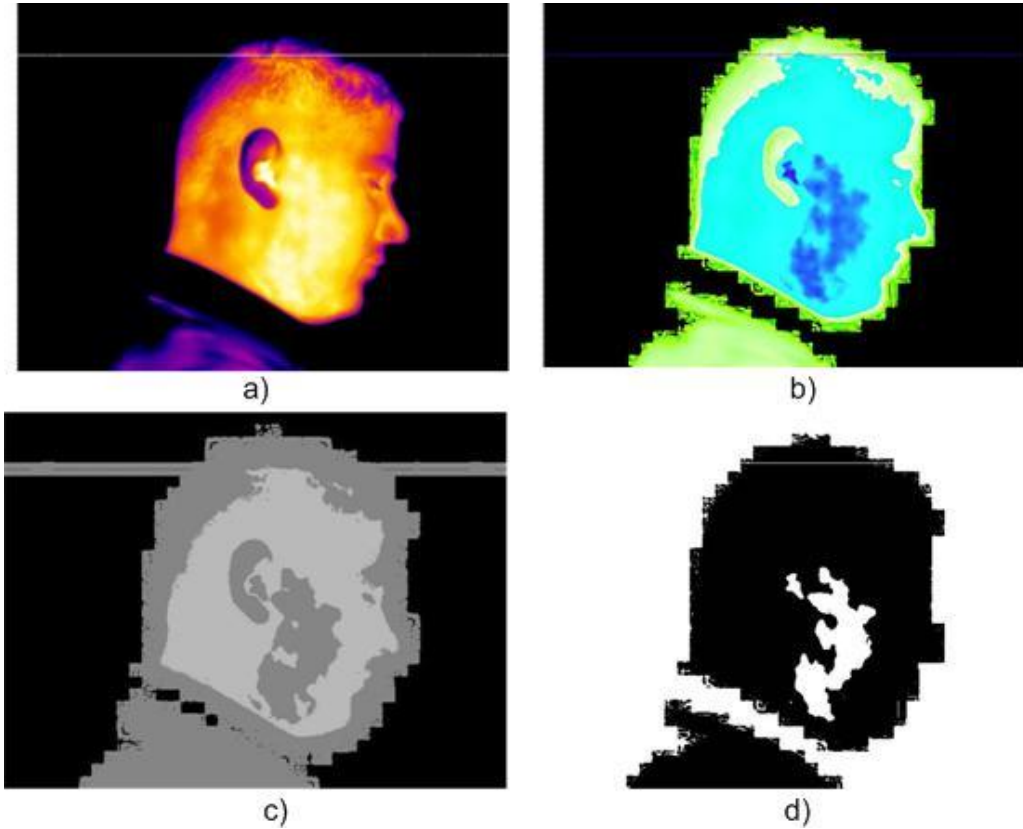


**Şekil 3.24.** 4. Çalışma a) Konuşma başlangıcında alınan b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.20.** 4. Çalışma: Konuşma başlangıcında FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	0	8035	99372	8,0858
EM	0	10901	119915	9,0906

Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.25'te, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.21'de gösterilmiştir.

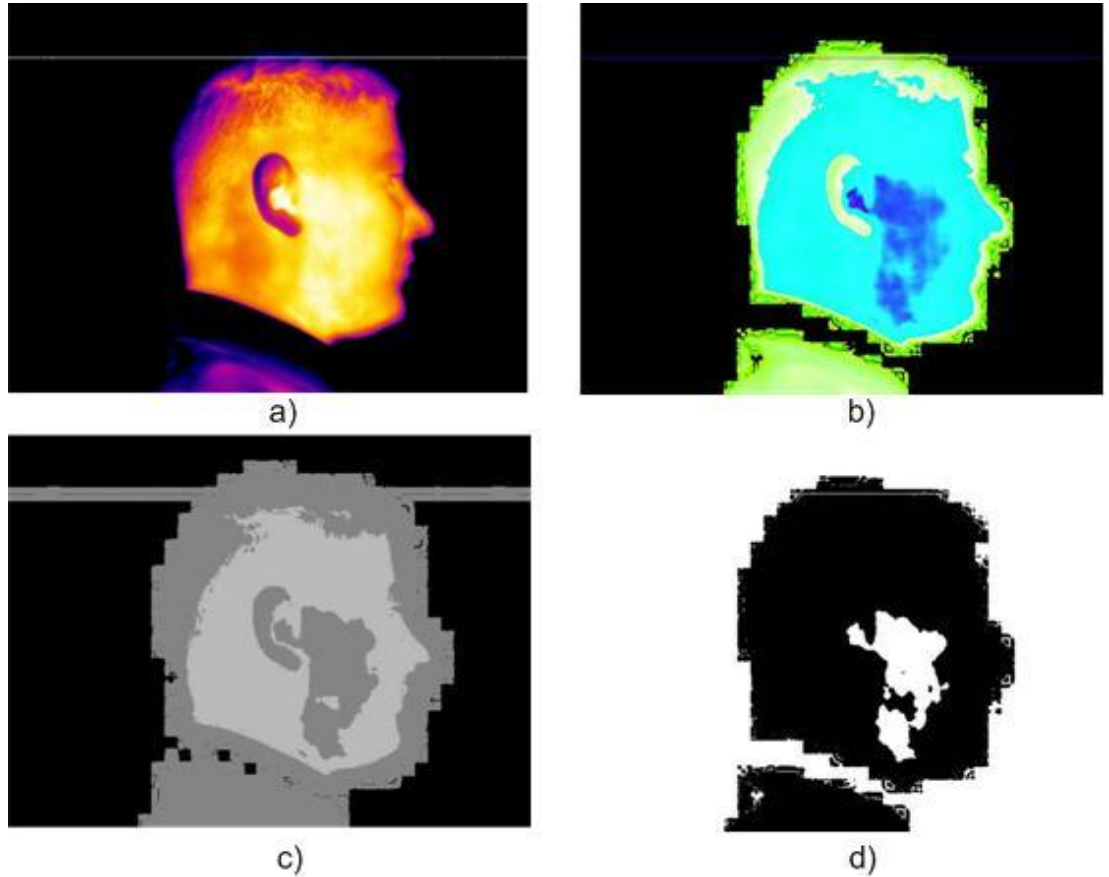


**Şekil 3.25.** 4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.21.** 4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 10 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin başa göre yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	10	8913	98559	9,0433
EM	10	12129	117006	10,3661

Konuşma başlangıcından 25 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.26'da, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.22'de gösterilmiştir.

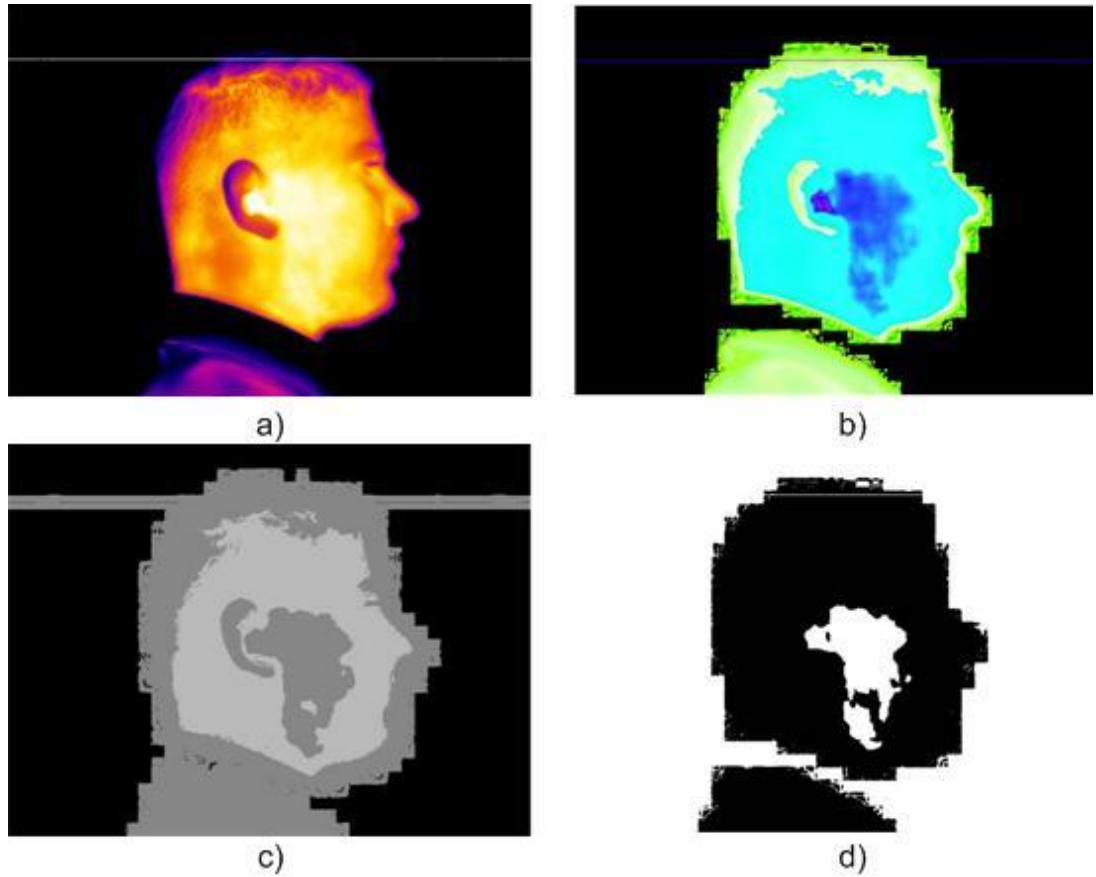


**Şekil 3.26.** 4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 25 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.22.** 4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 25 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	25	9513	99025	9,6067
EM	25	12362	116932	10,5719

Konuşma başlangıcından 35 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.27'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.23'te gösterilmiştir.

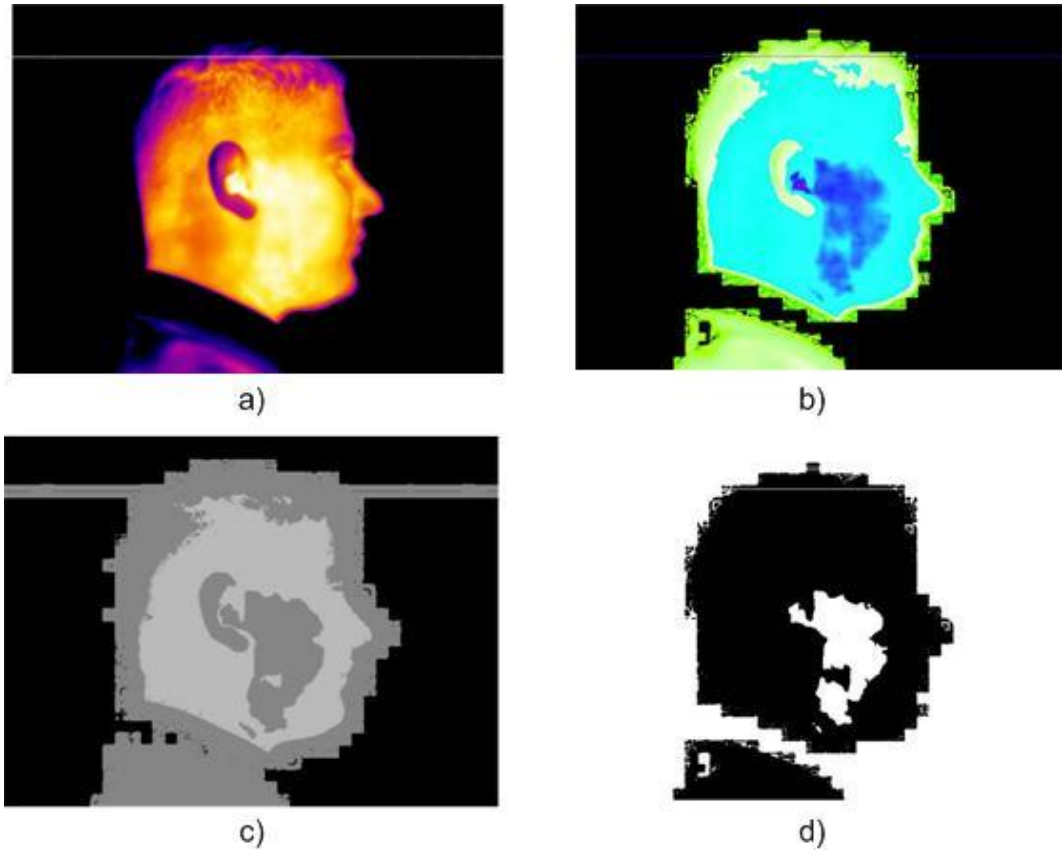


**Şekil 3.27.** 4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 35 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

**Çizelge 3.23.** 4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 35 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzde

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	35	10012	96926	10,3295
EM	35	13110	115708	11,3302

Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra çekilen RGB renk uzayından, HVS renk uzayına dönüştürülen, FCM ve EM ile elde edilen resimler Şekil 3.28'de, FCM ve EM ile elde edilen resimdeki sıcak bölgenin piksel sayısı, başı oluşturan piksel sayısı ve sıcak bölgenin başa göre yüzdesi Çizelge 3.24'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.28.** 4. Çalışma a) Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra b) HSV renk uzayındaki c) EM ile elde edilen d) FCM ile elde edilen veriler

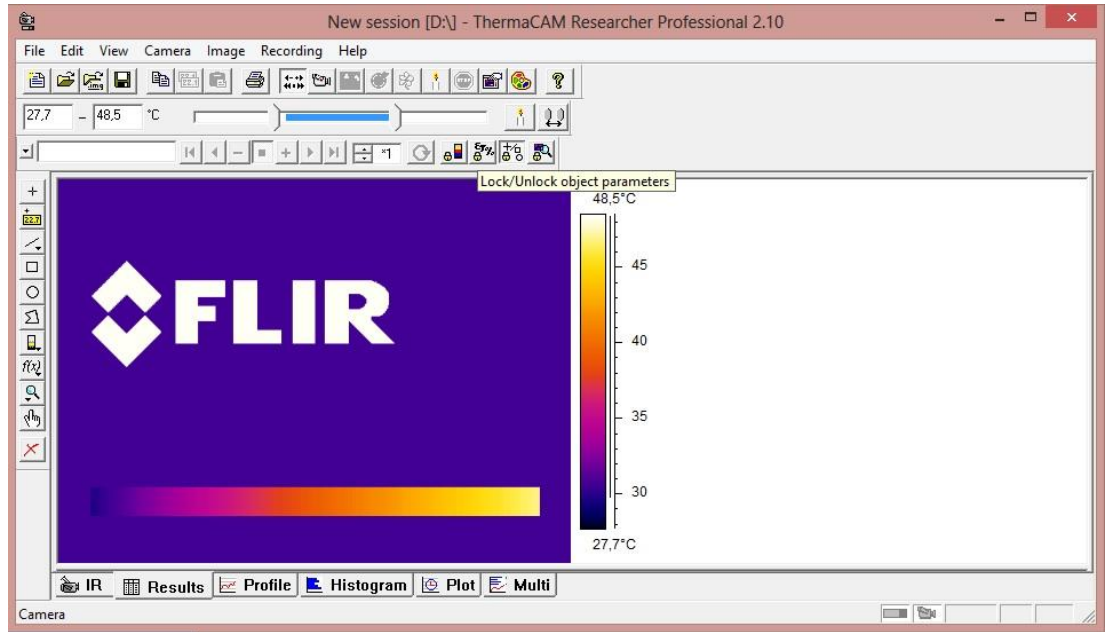


**Çizelge 3.24.** 4. Çalışma: Konuşma başlangıcından 50 dakika sonra FCM ve EM ile elde edilen resmin sıcak bölge ve baş piksel sayısı ile sıcak bölgenin yüzdesi

	Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı	Başı oluşturan piksel sayısı	Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi
FCM	50	10664	100578	10,6027
EM	50	13576	118743	11,4330

### 3.2. Termal Görüntüleme ile Elde Edilen Araştırma Bulguları

Bu bölümde cep telefonu konuşmasının termal kamera ile görüntülenmesi ile elde edilen resimler Flir firmasına ait ThermaCAM Researcher Pro 2.10 ile analiz edilmiştir. Programın ara yüzü Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



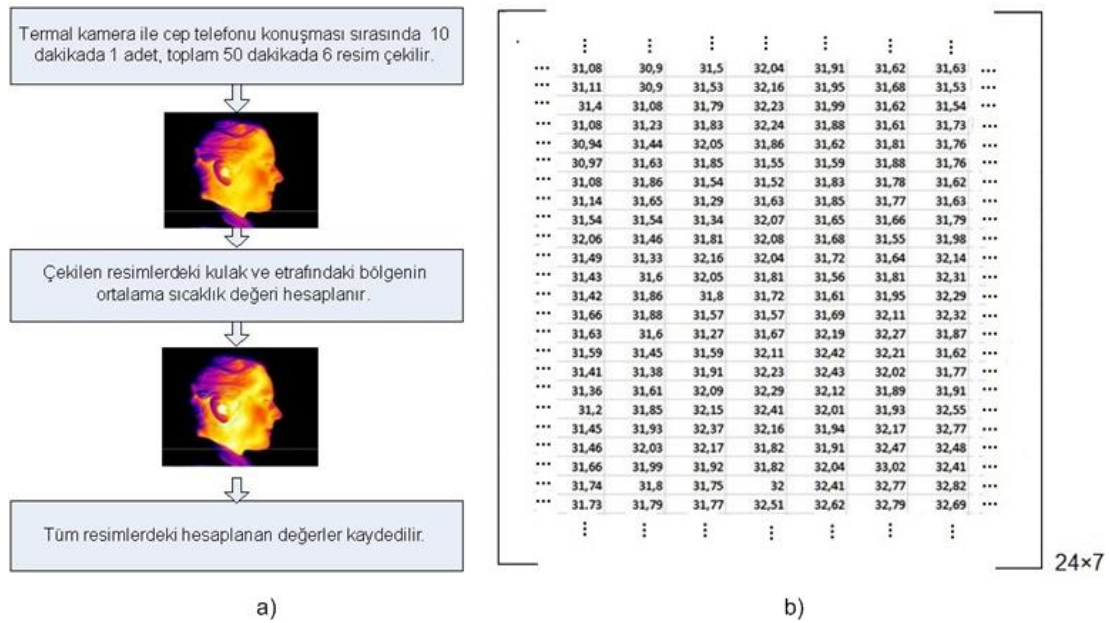
**Şekil 3.29.**ThermaCAM Researcher Professional 2.10 program arayüzü

Söz konusu programın özellikleri şunlardır;

- Resimdeki tüm alanın veya seçilen bir bölgenin ortalama, maksimum ve minimum sıcaklık değerlerini gösterebilme,

- Sıcaklık değerlerinin histogramını çizebilme,
- Resim ile aynı boyutlara sahip, değerleri resmin her pikselindeki sıcaklık bilgisi olan matris oluşturabilme,
- Piksellerin sıcaklık değerlerini Excel formatında dışarı aktarabilme gibi özelliklere sahiptir.

Termal kamera ile cep telefonu konuşması sırasında her 10 dakikada 1 tane olmak üzere toplam 6 adet çekilen resmin kulak ve etrafındaki bölgenin ThermaCAM Researcher Professional 2.10 programı kullanılarak ortalama sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Yapılan işlem tüm resimlere uygulanmıştır. Tüm resimlerde ortalama sıcaklık değeri hesaplanan bölge aynı bölgedir ve aynı boyutlara sahiptir. Termal görüntüleme ile analiz yöntemi ve piksel sıcaklık değerlerinin (640×480 piksel) bir bölümü (24×7) Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.30.** a) Termal görüntüleme ile analiz yöntemi b) Piksel sıcaklık değerlerinin bir kısmı

900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler Çizelge 3.25'te, 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip

cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler Çizelge 3.26'da, 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler Çizelge 3.27'de, 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler Çizelge 3.28'de gösterilmiştir ( $\mu$  , ortalama değer (°C);  $\sigma$  , standart sapma; G.O., geometrik ortalama (°C); Min., Minimum değer (°C); Max., Maksimum değer (°C)). Ortalama değer formülü eşitlik 3.1'de, geometrik ortalama formülü eşitlik 3.2'de, standart sapma formülü eşitlik 3.3'de gösterilmiştir. (N toplam veri sayısıdır)

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad (3.1)$$

$$G.O. = \sqrt[N]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_N} \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (3.3)$$

**Çizelge 3.25.** 900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler

Süre (Dakika)	$\mu$ (°C)	G.O. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)	$\sigma$	Sıcaklık Değişimi
0	34	33,92	29,4	37	2	0
10	34,3	34,34	27,3	37,2	1,9	0,3
20	34,9	34,82	30,3	37,2	1,4	0,6
30	35,2	35,18	30,9	37,3	1,3	1,2
40	35,6	35,62	31,9	37,3	0,9	1,6
50	36,2	36,08	32,7	37,3	0,6	2,2

**Çizelge 3.26.** 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler

Süre (Dakika)	$\mu$ (°C)	G.O. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)	$\sigma$	Sıcaklık Değişimi
0	34	33,92	29,3	36,2	1,4	0
10	34,4	34,39	30,08	36,6	1,4	0,4
20	34,8	34,74	30,3	36,6	1,2	0,8
30	34,9	34,83	30,3	36,7	1,3	0,9
40	35,1	35,03	30,7	36,7	1,1	1,1
50	35,2	35,21	31	36,9	1	1,2

**Çizelge 3.27.** 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler

Süre (Dakika)	$\mu$ (°C)	G.O. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)	$\sigma$	Sıcaklık Değişimi
0	33,4	33,32	28,9	37,4	2,1	0
10	34	33,94	29,9	37,5	1,8	0,6
20	34,2	34,19	30,4	37,4	1,6	0,8
30	34,3	34,27	30,6	37,4	1,5	0,9
40	34,4	34,36	30,7	37,3	1,5	1
50	34,6	34,58	30,5	37,7	1,4	1,2

**Çizelge 3.28.** 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışmada termal görüntüleme ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametreler

GSM900/ DCT1800	Süre (Dakika)	$\mu$ (°C)	G.O. (°C)	Min. (°C)	Max. (°C)	$\sigma$	Sıcaklık Değişimi
	0	33,1	32,92	28,9	37	1,7	0
GSM900	10	33,9	33,84	29,6	37,2	1,5	0,8
GSM900	25	34,7	34,71	30,1	37,3	1,2	1,3
GSM1800	35	34,8	34,80	30,4	37,4	1,2	1,7
GSM1800	50	35,1	35,09	30,2	37,4	1	2

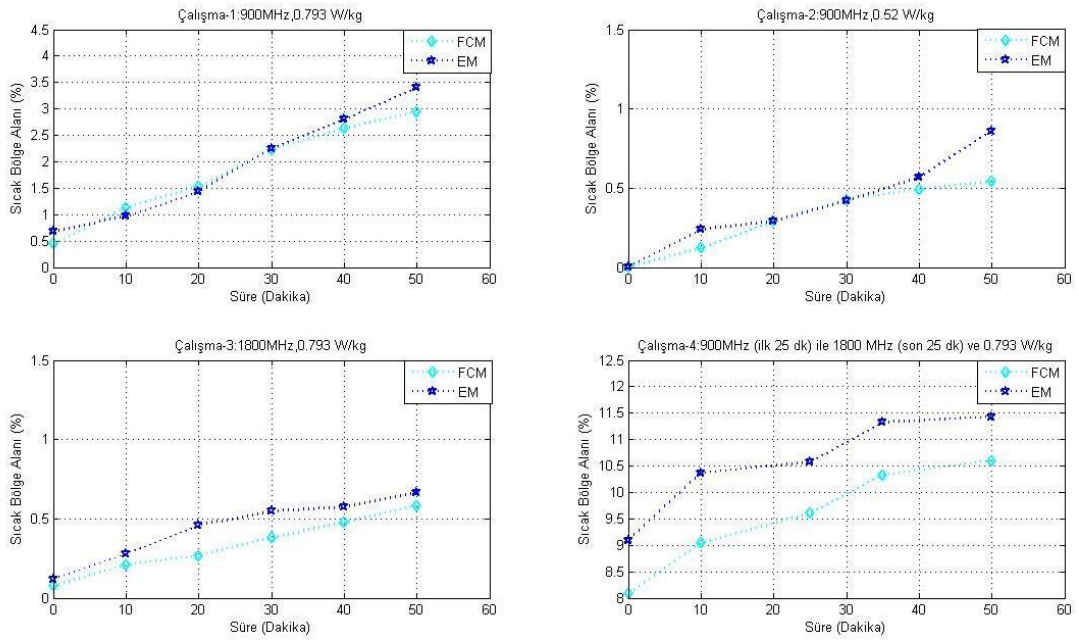
## 4. SONUÇLAR

FCM ve EM ile elde edilen,  
900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan  
çalışma verileri Çizelge 4.1'de,

900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan  
çalışma verileri Çizelge 4.2'de,

1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan  
çalışma verileri Çizelge 4.3'te,

900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR  
değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışma verileri Çizelge  
4.4'te verilmiştir. Ayrıca yapılan toplam 4 çalışma sonucunda, FCM ve EM ile  
elde edilen sıcak bölge yüzdeleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tüm Çalışmalarda FCM ve EM ile elde edilen veriler.

**Çizelge 4.1.** FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri

Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı		Başı oluşturan piksel sayısı		Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi	
	FCM	EM	FCM	EM	FCM	EM
0	728	1208	163828	177056	0,4444	0,6811
10	1854	1830	162787	187888	1,1389	0,9740
20	2480	2613	161691	181987	1,5338	1,4358
30	3587	4100	160217	182089	2,2388	2,2516
40	4380	5111	166232	182452	2,6349	2,8012
50	4792	6041	162302	177427	2,9525	3,4047

**Çizelge 4.2.** FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri

Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı		Başı oluşturan piksel sayısı		Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi	
	FCM	EM	FCM	EM	FCM	EM
0	3	7	159082	176737	0,0019	0,0039
10	197	483	157643	200809	0,1250	0,2405
20	502	856	171795	219038	0,2922	0,2922
30	751	927	174126	219979	0,4313	0,4214
40	816	1212	165131	213093	0,4942	0,5687
50	874	1795	161298	208708	0,5419	0,8600

**Çizelge 4.3.** FCM ve EM ile elde edilen 1800 MHz’de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri

Süre (Dakika)	Sıcak bölge piksel sayısı		Başı oluşturan piksel sayısı		Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi	
	FCM	EM	FCM	EM	FCM	EM
0	96	167	123242	138602	0,0779	0,1208
10	255	376	120809	134277	0,2111	0,2800
20	346	648	128252	141213	0,2698	0,4588
30	461	738	120533	134352	0,3825	0,5493
40	588	791	123066	137989	0,4778	0,5737
50	725	913	123956	137160	0,5849	0,6656

**Çizelge 4.4.** FCM ve EM ile elde edilen 900 MHz ve 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışma verileri

GSM900/ DCT1800 MHz	Süre (Dk.)	Sıcak bölge piksel sayısı		Başı oluşturan piksel sayısı		Sıcak bölgenin başa göre yüzdesi	
		FCM	EM	FCM	EM	FCM	EM
	0	8035	10901	99372	119915	8,0858	9,0906
900	10	8913	12129	98559	117006	9,0433	10,3661
900	25	9513	12362	99025	116932	9,6067	10,5719
1800	35	10012	13110	96926	115708	10,3295	11,3302
1800	50	10664	13576	100578	118743	10,6027	11,4330

İlk olarak 900 MHz frekansta, 0,793 W/kg ve 0,52 W/kg SAR değerlerine sahip cep telefonları ile aynı sürede (50 dakika) yapılan çalışmalarda elde edilen FCM ve EM verileri incelenmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun, kulak ve etrafındaki sıcak bölgede FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 2,5081 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 2,7236 artış meydana



getirdiği görülmüştür. Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere, 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun, kulak ve etrafındaki sıcak bölgede FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 0,5400 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 0,8561 artış meydana getirdiği görülmüştür. FCM ve EM ile elde edilen sonuçlara göre SAR değeri yüksek olan cep telefonunun, SAR değeri düşük olan cep telefonuna göre insan dokusunda daha fazla sıcaklık artışına sebep olduğu ve insan dokusunun elektromanyetik radyasyona daha fazla maruz kaldığı görülmüştür.

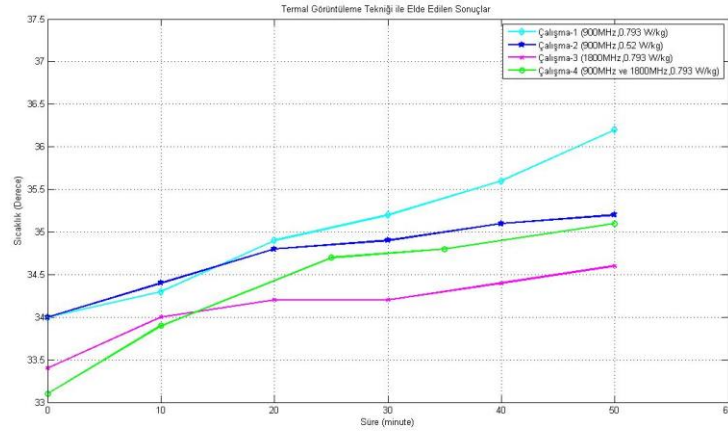
İkinci olarak 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun 900 MHz ve 1800 MHz'de aynı sürede (50 dakika) yapılan çalışmalarda elde edilen FCM ve EM verileri incelenmiştir. Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi 900 MHz'de çalışan cep telefonunun, kulak ve etrafındaki sıcak bölgede FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 2,5081 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 2,7236 artış meydana getirdiği görülmüştür. Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere, 1800 MHz'de çalışan cep telefonunun, kulak ve etrafındaki sıcak bölgede FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 0,507 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 0,5452 artış meydana getirdiği görülmüştür. FCM ve EM ile elde edilen sonuçlara göre 900 MHz'de çalışan cep telefonunun, 1800 MHz'de çalışan cep telefonuna göre insan dokusunda daha fazla sıcaklık artışına sebep olduğu ve insan dokusunun elektromanyetik radyasyona daha fazla maruz kaldığı görülmüştür.

Üçüncü olarak 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun 900 MHz ve 1800 MHz'de ardışık olarak her iki frekansın eşit sürede (25 dakika) kullanımı ile yapılan çalışmalarda elde edilen FCM ve EM verileri incelenmiştir. Cep telefonu ile toplam 50 dakika konuşma yapılmıştır. İlk 25 dakika cep telefonu 900 MHz'de, diğer 25 dakikada ise arada boş zaman bırakılmadan 1800 MHz'de çalıştırılmıştır. Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere, ilk 25 dakika 900 MHz'de yapılan konuşma sonucunda kulak ve etrafındaki sıcak bölgede, FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 1,5200 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 1,4813 artış meydana geldiği görülmüştür. Diğer 25 dakika 1800 MHz'de yapılan konuşma sonucunda kulak ve etrafındaki sıcak bölgede, FCM ile yapılan bölütleme sonucuna göre % 0,9960 ve EM ile bölütleme sonucuna göre % 0,8611 artış meydana geldiği görülmüştür. FCM

ve EM ile elde edilen sonuçlara göre, 900 MHz frekansta yapılan konuşmada meydana gelen sıcak bölgedeki artış miktarında, 1800 MHz frekansa geçildiğinde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Termal görüntüleme tekniği ile elde edilen;

900 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri, 900 MHz'de 0,52 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri, 1800 MHz'de 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışma verileri ve 900 MHz ile 1800 MHz frekanslarının sırayla 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonu kullanımı ile yapılan çalışma verileri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Ayrıca tüm çalışmalarda Termal görüntüleme tekniği ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2.** Termal Görüntüleme Tekniği ile elde edilen sonuçlar

**Çizelge 4.5.** Termal görüntüleme tekniği ile elde edilen verilere ait istatistiksel parametrelerin değişimi

Frekans (MHz)	SAR (W/kg)	$\Delta \mu$ (°C)	$\Delta(G.O.)$ (°C)	$\Delta Min.$ (°C)	$\Delta Max.$ (°C)	$\Delta \sigma$
900	0,793	2,2	2,16	3,3	0,3	1,4
900	0,52	1,2	1,29	1,7	0,7	0,4
1800	0,793	1,2	1,26	1,6	0,3	0,7
900 1800	0,793	1,6 0,4	1,6 0,38	1,2 0,1	0,3 0,1	0,5 0,2

İlk olarak 900 MHz frekansta, 0,793 W/kg ve 0,52 W/kg SAR değerlerine sahip cep telefonları ile aynı sürede (50 dakika) yapılan çalışmalarda termal görüntüleme tekniği ile elde edilen veriler incelenmiştir. Kulak ve etrafındaki bölgedeki maksimum ve minimum sıcaklık değerleri incelendiğinde minimum sıcaklıktaki değişim, maksimum sıcaklıktaki değişime göre daha fazladır. Ayrıca her iki SAR değerinde (0,793 ve 0,52 W/kg) yapılan çalışmalardaki standart sapmada meydana gelen azalma piksellerin sıcaklık değerlerinin birbirine yakınlaştığını göstermiştir. Maksimum sıcaklıktaki değişimin düşük olması nedeniyle piksel sıcaklıklarında ani artışlar olmadığı, doku tarafından soğurulan gücün, dokunun bir bölümüne değil geneline yayıldığı tespit edilmiştir. Yüksek SAR değerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada standart sapmada meydana gelen değişimin, düşük SAR değerine sahip olan cep telefonu ile yapılan çalışmada standart sapmada meydana gelen değişimden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak Çizelge 4.5'e göre; 900 MHz'de iki farklı SAR değerine sahip cep telefonu (0,793 ve 0,52 W/kg) ile yapılan çalışmada SAR değeri yüksek olan cep telefonunun kulak ve etrafında daha fazla sıcaklık artışına ve dolayısıyla daha fazla elektromanyetik radyasyonun emilimine sebep olduğu görülmüştür

İkinci olarak 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun 900 MHz ve 1800 MHz'de aynı sürede (50 dakika) yapılan çalışmalarda termal görüntüleme tekniği ile elde edilen veriler incelenmiştir. 900 MHz'de çalışan cep telefonu ile yapılan çalışmada standart sapmada meydana gelen değişimin, 1800 MHz'de çalışan cep telefonu ile yapılan çalışmada standart sapmada meydana gelen değişimden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.5'e göre; eşit SAR değerlerine sahip cep telefonu ile yapılan çalışmada, 900 MHz'de kulak ve etrafındaki bölgede meydana gelen sıcaklık artışının 1800 MHz'de kulak ve etrafındaki bölgede meydana gelen sıcaklık artışından daha fazla olduğu görülmektedir. Buna göre eşit SAR değerine sahip cep telefonunun 900 MHz'de, 1800 MHz'e göre daha fazla elektromanyetik radyasyonun emilimine sebep olduğu görülmüştür.

Üçüncü olarak 0,793 W/kg SAR değerine sahip cep telefonunun 900 MHz ve 1800 MHz'de ardışık olarak her iki frekansın eşit sürede (25 dakika) kullanımı ile yapılan çalışmalarda termal görüntüleme tekniği ile elde edilen veriler incelenmiştir. Cep telefonu ile toplam 50 dakika konuşma yapılmıştır. İlk 25 dakika cep telefonu 900 MHz'de, diğer 25 dakikada ise arada boş zaman bırakılmadan 1800 MHz'de çalıştırılmıştır. İlk 25 dakika sonunda kulak ve etrafındaki bölgede meydana gelen sıcaklık artışı, son 25 dakikaya göre daha fazla olduğu görülmektedir. İlk 25 dakika boyunca 900 MHz'de meydana gelen sıcaklık artış hızı 1800 MHz'e geçildiğinde azaldığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] [www.tuik.gov.tr/PrelstatistikTablo.do?istab\\_id=1580](http://www.tuik.gov.tr/PrelstatistikTablo.do?istab_id=1580) (Erişim tarihi: 10.09.2013)
- [2] Y. Houdas, E.F.J. Ring, Human body temperature, plenum press, New York,1982.
- [3] E.F.J. Ring, The historical development of temperature measurement in medicine, *Infrared Physics & Technology* 49 297–301, 2007.
- [4] J.H. Tan, E.Y.K. Ng, U.R. Acharya, C. Chee, Infrared thermography on ocular surface temperature: a review, *Infrared Physics & Technology* 52 97–108, 2009.
- [5] B.F. Jones, A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17, 1019–1027, 1998.
- [6] N. Bouzida, A. Bendada, X.P. Maldague, Visualization of body thermoregulation by infrared imaging, *Journal of Thermal Biology* 34, 120–126, 2009.
- [7] F. Ring, Thermal imaging today and its relevance to diabetes, *Journal of Diabetes Science and Technology* 4, 857–862, 2010
- [8] G. Martine, *Essays medical and philosophical*, millar, London, 1740.
- [9] C. Wunderlich, W. Woodman, On the temperature in diseases, a annual of medical thermometry, vol. 71, The New Sydenham Society, London, England, 1871.

- [10] J.D. Hardy, The radiation of heat from the human body. I–IV, Journal of Clinical Investigation 13, 593–620 & 817–883, 1934.
- [11] J.D. Hardy, C. Muschenheim, The radiation of heat from the human body. V, Journal of Clinical Investigation 15, 1–8, 1936.
- [12] A Historical perspective of thermography, omega. <http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/historical3.html>( Erişim tarihi: 10.09.2013)
- [13] B.B. Lahiri, S. Bagavathiappan, P.R. Reshmi, J. Philip, T. Jayakumar, B. Raj, Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography, Infrared Physics & Technology 55, 191–199, 2012.
- [14] R.B. Barnes, Thermography of the human body, Science 140, 870–877, 1963.
- [15] R.A. Sherman, A.L. Wideman, K.W. Karstetter, Comparative effectiveness of videothermography, contact thermography, and infrared beam thermography for scanning relative skin temperature, Journal of Rehabilitation Research and Development 33, 377–386, 1996.
- [16] X. Maldague, Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, first ed., John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [17] M.F. Modest, Radiative heat transfer, second ed., Academic Press, California, 2003.
- [18] Y.V. Gulyaev, A.G. Markov, L.G. Koreneva, P.V. Zakharav, Dynamical infrared thermography in humans, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine 14, 766–771, 1995.

- [19] American Cancer Society: Cancer facts and Figures. [www.cancer.org/docroot/STT/stt\\_0.asp](http://www.cancer.org/docroot/STT/stt_0.asp) (Erişim tarihi:10.09.2013).
- [20] National Cancer Institute: SEER Stat Fact Sheets: Breasts. [www.seer.cancer.gov/statfacts/html/breast.html](http://www.seer.cancer.gov/statfacts/html/breast.html). (Erişim tarihi: 13.10.2013).
- [21] D. Kennedy, T. Lee, D. Seely, A comparative review of thermography as a breast screening technique, *Integrative Cancer Therapies* 8, 9–16, 2009.
- [22] Breast Thermography, in: W.C. Amalu (Ed.), Redwood City, California 94063, 2011. [http://www.breastthermography.com/case\\_studies.htm](http://www.breastthermography.com/case_studies.htm). (Erişim tarihi: 13.10.2013).
- [23] A.V. Nguyen, N.J. Cohen, H. Lipman, C.M. Brown, N.A. Molinari, W.L.Jackson, H. Kirking, P. Szymanowski, T.W. Wilson, B.A. Salhi, R.R. Roberts, D.W. Strykar, D.B. Fishbein, Comparison of 3 infrared thermal detection systems and self-report for mass fever screening, *Emerging Infectious Diseases* 16, 1710–1717, 2010.
- [24] H. Nishiura, K. Kamiya, Fever screening during the influenza (H1N1-2009) pandemic at Narita International Airport, Japan, *BMC Infectious Diseases*,111–121, 2011.
- [25] J.V.C. Vargas, M.L. Brioschi, F.G. Dias, M.B. Parolin, F.A. Mulinari-Brenner, J.C.Ordonez, D. Colman, Normalized methodology for medical infrared imaging, *Infrared Physics & Technology* 52, 42–47, 2009.
- [26] B. Gratt, V. Shetty, M. Dent, M. Saiar, E. Sickles, Electronic thermography for the assessment of inferior alveolar nerve deficit, *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 80, 153–160, 1995.

- [27] M. Cummings, P. Biagioni, P. Lamey, D. Burden, Thermal image analysis of electrothermal debonding of ceramic brackets: an in-vitro study, *European Journal of Orthodontics* 21, 111–118, 1999.
- [28] R.D. Cesaris, A. Grimaldi, M. Balestrazzi, G. Ranieri, R. Chirappa, F. Avantaggiato, Changes in blood pressure and thermographic values resulting from use of a beta-blocker plus diuretic and of an alpha-beta-blocker plus diuretic, *drugs under experimental and clinical research* 11 725–729, 1985.
- [29] D. Thomas, G. Siahamis, M. Marion, C. Boyle, Computerised infrared thermography and isotopic bone scanning in tennis elbow, *Annals of the Rheumatic Diseases* 51, 103–107, 1992.
- [30] M. Bhatia, J.R. Poley, J.D. Haberman, D.J. Boon, Abdominal Thermography in infantile and childhood liver diseases, *Southern Medical Journal* 69, 1045–1048, 1976.
- [31] O.B. Milonov, O.D. Lebedeva, L.A. Pomelova, The use of echography and thermography in patients with parasitic liver diseases, *Sovetskaia Meditsina* 4, 62–67, 1980.
- [32] H. Kopsa, W. Czech, P. Schmidt, J. Zazgornik, P. Pils, P. Balcke, Use of thermography in kidney transplantation: two year follow up study in 75 cases, *Proceedings of the European Dialysis and Transplant Association* 16, 383–387, 1979.
- [33] A.M.D. Grand, J.V. Frangioni, An operational near-infrared fluorescence imaging system prototype for large animal surgery, *Technology in Cancer Research and Treatment* 2, 553–562, 2003.



- [34] Maria Daria Taurisano and André Vander Vorst, "Experimental Thermographic Analysis of Thermal Effects Induced on a Human Head Exposed to 900-MHz Fields of Mobile Phones" IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. 48, no. 11, november 2000.
- [35] D.S. Yoo, J.D. Park, "Thermographic analysis of thermal effects in a tissue-equivalent phantom at 835 MHz" Antennas and Propagation Society International Symposium IEEE, 2003.
- [36] Christian Kargel, "Infrared Thermal Imaging to Measure Local Temperature Rises Caused by Handheld Mobile Phones" IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 54, no. 4, August 2005.
- [37] Rusnani A., Norsuzila N., "Measurement and Analysis of Temperature Rise caused by Handheld Mobile Telephones using Infrared Thermal Imaging" IEEE international RF and microwave conference proceedings December 2-4, Kuala Lumpur, MALAYSIA, 2008.
- [38] D.A.A. Mat, K. Kipli, S. Sahrani, W.T. Kho, K. Lias, A. Joseph A, S.W. Marzuki, "Electromagnetic Radiation towards Adult Human Head from Handheld Mobile Phones" international Journal of Network and Mobile Technologies vol 1 / 2 / NOVEMBER 2010.
- [39] Challis LJ. Review: Mechanisms for Interaction Between RF Fields and Biological Tissue, Bioelectromagnetics Supplement , 7: S98-S106, 2007.
- [40] [www.wikipedia.org/Elektromanyetik\\_Tayf\\_TR.jpg&filetimestamp](http://www.wikipedia.org/Elektromanyetik_Tayf_TR.jpg&filetimestamp), (erişim tarihi: 01.02.2014).

- [41] ICNIRP 1998 Standards: Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, 74: 494–522, 1998.
- [42] FCC (Federal Communications Commission) OET (Office of Engineering & Technology): Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields, Edition 97–01, OET Bulletin 65, August 1997.
- [43] IEEE Standards: IEEE Standards for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std. C95.1, 1999.
- [44] Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz, Safety Code 6, Health Canada/Santé Canada, Canada, 1999.
- [45] Sırav B. Radyo Frekans Radyasyon (RFR) Kaynakları, Ülkeler ve Uluslararası Kurumların Standartları, Türkiye’de Durum, Bir Pilot Bölge Radyasyon Hesaplaması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [46] Matthes R. Non-Ionizing Radiation, Austria, ICNIRP–1/96, 1996.
- [47] <http://en.wikipedia.org/wiki/GSM> (erişim tarihi: 01.02.2014).
- [48] <http://tr.wikipedia.org/wiki/2G> (erişim tarihi: 01.02.2014).
- [49] Telekomünikasyon Kurumu web sayfası, [www.tk.gov.tr](http://www.tk.gov.tr), 2014 [erişim tarihi:04.02.2014].

- [50] Y. Z. Yin, J. P. Ma, Y. J. Zhao, H. L. Zheng, and Y. M. Guo, "Wideband Printed Dipole Antenna for Wireless LAN," *IEEE Antennas Propagat. Soc.*, vol. 2B, pp.568–571, Jul. 2005.
- [51] A. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "Performance Analysis of Antennas for Hand-held Transceivers Using FDTD," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-42, 8, pp. 1106-1113, August 1994.
- [52] Bernhard, J., Michielssen, E., *Antenna Parameters, Various Generic Antennas and Feed Systems, and Available Software. Handbook of Antennas in Wireless Communications*, Godora, L.C.(ed), CRC Press, 2002.
- [53] Z. D. Liu, P. S. Hall, and D. Wake, "Dual Frequency Planar Inverted-F Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-45, 10, pp. 1451-1458, October 1997.
- [54] Balanis, C. A., *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd Edition, Wiley&Sons, New York, 2005.
- [55] C. R. Rowell, "A Performance Comparison of Recent GSM Handsets," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, Session 406-URSI B, July 2006.
- [56] C. R. Rowell and E. Y. Lam, "A Novel Antenna Isolation Method for Mobile Phone Antennas," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest*, pp. 1922-1925, July 2011
- [57] P. Ciaisi, R. Staraj, G. Kossiavas, and C. Luxey, "Design of an Internal Quad-Band Antenna for Mobile Phones," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 4, 4, pp. 148-150, April 2004.

- [58] Corbett, et al. 'Mobile-Phone Antenna Design', IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.54, No.4, Aug.2012.
- [59] Chou CK, Bassen H, Osepchuk J, Balzano Q, et al. Radio Frequency Electromagnetic Exposure: Tutorial Review on Experimental Dosimetry. Bioelectromagnetics 17, 195-208, 1996.
- [60] Johnson CC, Guy AW. Nonionizing Electromagnetic wave effects in Biological Materials and System: Proc IEEE 60, 692-718, 1972.
- [61] Durney CH, Massodi H, Iskander MF. Radiofrequency Radiation Dosimetry Hadbook. 4 th ed. Utah: (Report TR-85-73) Brooks Air Force Base,TX: USAF School of Aerospace Medicine, 1986.
- [62] Mittleman E, Osborne SL, Coulter J. Shortwave Diathermy Power Absorption and Deep Tissue Temperature.Arch Phys Ther, 22: 133-139, 1947.
- [63] Cogan DG, Fricker SJ, Lubin M, Donaldson DD, Hardy H. Cataracts and UHF Radiation. AMA Arch Indust Med, 10: 299-302, 1958.
- [64] <http://www.indexsar.com/air-field-probes.html>(erişim tarihi: 01.02.2014).
- [65] F. Akleman & L. Sevgi. "FDTD Analysis of human headmobile phone interaction in terms of specific absorption rate calculations and antenna design." IEEE-APS Conference, Antennas and propagation for wireless communication, vol. 1.pp. 85-88, 1998.
- [66] A. Rogalski, "Infrared Detectors: an overview," Infrared Physics & Technology, Vol. 43, pp. 187-210, 2002.
- [67] H. Koçer, Numerical Modeling And Optimization of HgCdTe Infrared Photodetectors For Thermal Imaging. Doktora Tezi, ODTÜ, 2011.

- [68] The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals. [http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T559243/T559243\\_APAC.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography/MMC/Brochures/T559243/T559243_APAC.pdf) (erişim tarihi: 20.01.2013).
- [69] The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Bellingham, Washington USA, SPIE Optical Engineering Press 1993.
- [70] S. Özer, InSb and InAsSb infrared photodiodes on alternative substrates and InP/InGaAs quantum well infrared photodetectors: pixel and focal plane array performance. Doktora Tezi, ODTÜ, 2005.
- [71] Zhang, H., Huizenga, C. Arens, E. and Yu T., Considering Individual Physiological Differences in a Human Thermal Model, J. Thermal Biology 26, 401-408, 2001.
- [72] Smith, F. G. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Atmospheric Propagation of Radiation, Volume 2. Washington, 1993.
- [73] Rogalski, A. and Chrzanowski, K., Infrared devices and techniques. Opto-Electronics Review, 10 (2); 111-136, 2002.
- [74] Hamamatsu, Technical Information SD-12. Characteristic and use of infrared detectors. 43, 2004.
- [75] Glenn D. Boreman, Basic electro-optics for electrical engineers, SPIE Vol. TT31, 1995.
- [76] Dereniak, E.L. and Boreman, G.D. Infrared Detectors and Systems. A Wiley-Interscience Publication, 553, Canada, 1996.

- [77] Akin, T. CMOS based thermal sensor in advanced micro & nanosystems volume: 2 CMOS-MEMS, Edited by Baltes, H., Brand, O., Fedder, K.G., Hierold, C., Korvink, J., Tabata, O., WILEY-VHC Verlag GmbH & Co. KGaA, 479-512, Germany, 2005.
- [78] Antoni Rogalski, Infrared Photon Detectors, SPIE Press, 1995.
- [79] L.J. Kozlowski, W.F. Kosonocky, Infrared detector arrays, in: M. Bass, E.W. Van Stryland, D.R. Williams, W.L. Wolfe (Eds.), Handbook of Optics, McGraw-Hill Inc., New York, 1995 (Chapter 23).
- [80] Zussman, A., Levine, B. F., Kuo, J. M. and Jong, J., Extended longwavelength  $\lambda=11-15 \mu\text{m}$  GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum-well infrared photodetectors. J. Appl. Phys., 70; 5101-5107, 1991.
- [81] Dunn, J.C., A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact well separated clusters. Journal of Cybernetics, Vol. 3, pp. 32-57, 1974.
- [82] J. C. Bezdek, "Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms", Plenum Press, New York, 1981.
- [83] Höppner, F., Klawonn, F., Kruse, R., and Runkler, T., Fuzzy Cluster Analysis, John Wiley & Sons, Chichester, 2000.
- [84] SAR Value, <http://www.s21.com/sar.htm> (Erişim tarihi: 15.02.2014).

**EK 1. GÜNÜMÜZDE KULLANILAN BAZI CEP TELEFONLARININ SAR DEĞERLERİ**

<b>CEP TELEFONU MARKASI</b>	<b>CEP TELEFONU MODELİ</b>	<b>SAR DEĞERİ (W/kg)</b>
Apple	iPhone 3G S	1.19
Apple	iPhone 4	1.18
Apple	iPhone 4S	1.18
Apple	iPhone 5	1.25
Apple	iPhone 5c	1.19
Apple	iPhone 5s	1.19
BlackBerry	9720	1.28
BlackBerry	Bold 9790	1.73
BlackBerry	Bold 9900	1.19
BlackBerry	Curve 8900	1.01
BlackBerry	Curve 9300	1.45
BlackBerry	Curve 9320	1.56
BlackBerry	Curve 9360	1.49
HTC	Desire	0.752
HTC	Desire 500	0.724
HTC	Desire 601 Dual Sim	1.120

HTC	Desire X	1.590
HTC	One	1.260
HTC	One Max	0.813
HTC	One Mini	0.897
HTC	One S	1.000
HTC	One X	1.210
LG	G2	0.97
LG	Nexus 4	0.56
Motorola	A830	0.69
Motorola	A835	0.55
Motorola	A920	0.75
Motorola	A925	0.65
Motorola	A1000	1.13
Motorola	C200	0.78
Motorola	C250	0.83
Motorola	C300	0.95
Motorola	C331	0.81
Motorola	C332	0.81
Motorola	C333	0.81
Motorola	C336	0.81



Motorola	C350	0.90
Nokia	E51	1.40
Nokia	E7	1.28
Nokia	E71	1.33
Nokia	E72	1.31
Nokia	Lumia 520	1.09
Nokia	Lumia 620	0.84
Nokia	Lumia 625	0.95
Nokia	Lumia 720	0.76
Nokia	Lumia 820	0.94
Nokia	Lumia 920	0.70
Nokia	Lumia 925	0.92
Nokia	Lumia 1020	0.82
Nokia	Lumia 1320	0.56
Nokia	Lumia 1520	0.72
Nokia	N70	0.95
Nokia	N71	0.38
Nokia	N72	0.76
Nokia	N73	0.92
Nokia	N8	1.02

Nokia	N80	0.48
Nokia	N90	0.29
Nokia	N91	0.67
Nokia	N93	0.69
Nokia	N95	0.58
Nokia	N96	0.91
Nokia	N97	0.66
Nokia	N900	0.80
Nokia	X6	1.11
Panasonic	GD96	0.759
Panasonic	GD520	0.95
Panasonic	P341i	0.459
Panasonic	X60	0.672
Panasonic	X70	0.459
Panasonic	X300	0.863
Panasonic	X400	0.555
Panasonic	Z70	0.459
Samsung	Galaxy Apollo	0.575
Samsung	Galaxy Europa	0.645
Samsung	Galaxy Fame	0.831

Samsung	Galaxy Mega	0.374
Samsung	Galaxy Mini	0.961
Samsung	Galaxy Mini 2	0.917
Samsung	Galaxy Nexus	0.456
Samsung	Galaxy Note	0.209
Samsung	Galaxy Note II	0.369
Samsung	Galaxy Note 3	0.363
Samsung	Galaxy S	0.510
Samsung	Galaxy S Advance	0.750
Samsung	Galaxy S2	0.351
Samsung	Galaxy S3 Mini	0.584
Samsung	Galaxy S3	0.547
Samsung	Galaxy S4	0.399
Samsung	Galaxy S4 Active	0.358
Samsung	Galaxy S4 Mini	0.332
Samsung	Galaxy Y	0.655
Samsung	Galaxy Young	0.742
Samsung	i300	0.742
Siemens	S451	0.89
Siemens	SL42	0.89

Siemens	SL45	0.89
Siemens	SL45i	0.89
Siemens	SL55	0.62
Siemens	ST55	0.74
Siemens	ST60	0.47
Siemens	SX1	0.52
Sony	Xperia C	0.522
Sony	Xperia E	0.87
Sony	Xperia J	0.73
Sony	Xperia L	0.69
Sony	Xperia M	0.859
Sony	Xperia SP	0.79
Sony	Xperia Z	0.48
Sony	Xperia Z1	0.773
Sony	Xperia Z1 Compact	0.74
Sony	Xperia Z Ultra	0.339
Sony Ericsson	V800	1.05
Sony Ericsson	Z200	0.94
Sony Ericsson	Z208	0.94
Sony Ericsson	TZ600	0.16