



Monitoring and modelling of long-term radiofrequency electromagnetic field levels

Çetin Kurnaz^{1*}, Mustafa Mutlu²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Ondokuz Mayıs University, Samsun, 55139, Turkey

²Vocational School of Technical Sciences, Ordu University, Ordu, 55200, Turkey

Highlights:

- Determination of the radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in the home environment.
- Examination of statistical changes of long-term RF-EMF values.
- Proposal of a mathematical expression to determine the change of RF-EMF during a day

Keywords:

- Radiofrequency electromagnetic field
- Long-term Radiofrequency electromagnetic field measurement
- Base stations
- ICNIRP

Article Info:

Research Article
Received: 01.11.2019
Accepted: 08.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641287

Correspondence:

Author: Çetin Kurnaz
e-mail: ckurnaz@omu.edu.tr
phone: +90 362 312 1919 / 1109

Graphical/Tabular Abstract

The increase in the demand of the cellular system users for their services requiring high data rates, and the fact that each base station can serve a limited geographical region causes the number of base stations to increase. Each base station is an EMF source and the increase in base stations also increases the levels of exposed EMF. Measuring EMF levels from base stations and checking their compliance with limit values are of great importance for human health. Therefore, in this study, RF-EMF levels exposed for 24 hours were recorded in 40 different home environments that are in line of sight with the base stations and detailed analyses were performed.

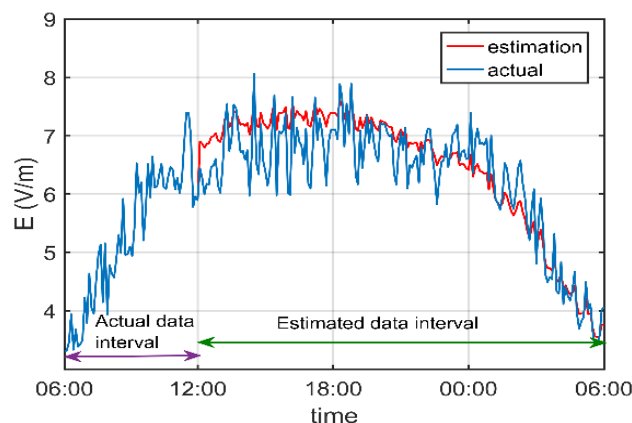


Figure A. Actual and estimated data intervals of one day RF-EMF's

Purpose:

To investigate of the change of RF-EMF exposed in the home environment during a day and which method can be best expressed the distribution of RF-EMF. Unlike the studies in the literature, to propose a new mathematical model which gives the change of RF-EMF during a day.

Theory and Methods:

In this study, 24-hour RF-EMF measurements were carried out in a total of 40 different locations in Ordu city center between 2017 and 2018 in the frequency range of 100 kHz to 3GHz in order to analyse and define a model the change of RF-EMA value in the home environment. Long-term RF-EMF measurements were conducted with PMM-8053 EMF meter, while band selective RF-EMF measurements were conducted with SRM-3006 EMF meter to determine the main sources of RF-EMF in the environment.

Results:

The highest RF-EMF value was recorded as 17.31 V/m and the average of 24-hour RF-EMF measurements was 14.16 V/m. The analysis results show that the measured RF-EMF values were below the limit values set by ICNIRP and BTK. It seen from the results that the RF-EMF level varies according to the measurement time, and the RF-EMF value measured at noon hours is approximately 32% higher than night hours. Additionally, long-term RF-EMF data measured in home environment can be best expressed by Burr distribution.

Conclusion:

A novel mathematical model is proposed which gives the change of RF-EMF during a day. With the proposed model, the change of RF-EMF over 24 hours can be estimated with accuracy of up to 95% using the 6-hour average and standard deviation values of RF-EMF during a day.



Uzun süreli radyofrekansı elektromanyetik alan seviyesinin izlenmesi ve modellenmesi

Çetin Kurnaz^{1*}, Mustafa Mutlu²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55139 Kurupelit, Samsun, Türkiye

²Ordu Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 52200, Altınordu, Ordu, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Ev ortamında maruz kalınan radyofrekansı elektromanyetik alan (RF-EMA) seviyesinin belirlenmesi
- Uzun süreli RF-EMA verisinin istatistiksel değişiminin incelenmesi
- RF-EMA'nın gün içindeki değişimini belirlemek için matematiksel bir ifade önerilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.11.2019

Kabul: 08.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641287

Anahtar Kelimeler:

Radyofrekansı
elektromanyetik alan,
uzun süreli Radyofrekansı
elektromanyetik alan
ölçümü,
baz istasyonu,
ICNIRP

ÖZET

Bu çalışmada ev ortamında maruz kalınan radyofrekansı elektromanyetik alan (RF-EMA) seviyesini belirlemek ve değişimini modellemek için 100 kHz- 3 GHz frekans aralığında 24 saat süreli RF-EMA ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde en yüksek RF-EMA değeri 17,31 V/m olarak kaydedilmiş olup bu değer ICNIRP ve BTK tarafından belirlenen limit değerlerin altındadır. Baz istasyonlarını doğrudan gören ölçüm konumlarında RF-EMA değeri ölçüm zamanına göre değişmektedir. Öğlen saatlerinde ölçülen RF-EMA değeri gece saatlerine göre yaklaşık %32 daha fazladır. Uzun süreli RF-EMA verisinin istatistiksel değişimi incelendiğinde en iyi Burr dağılımı ile ifade edildiği görülmüştür. Çalışmanın son aşamasında RF-EMA'nın gün içindeki değişimi incelenmiş ve literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model ile ev ortamında gün içindeki 24 saat süreli RF-EMA'nın değişimi sadece 6 saatlik RF-EMA değeri kullanılarak ve ölçüme gerek olmadan %95'e varan doğrulukla belirlenebilir.

Monitoring and modelling of long-term radiofrequency electromagnetic field levels

H I G H L I G H T S

- Determination of the radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in the home environment
- Examination of statistical changes of long-term RF-EMF values
- Proposal of a mathematical expression to determine the change of RF-EMF during a day

Article Info

Research Article

Received: 01.11.2019

Accepted: 08.10.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.641287

Keywords:

Radiofrequency
electromagnetic field
Long-term Radiofrequency
electromagnetic field
measurement,
Base stations,
ICNIRP

ABSTRACT

In this study, in order to determine the radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) level exposed in the home environment and to model its change, 24-hour RF-EMF measurements were performed in the frequency range of 100 kHz to 3 GHz. In measurements, the highest RF-EMF value was recorded as 17.31 V/m, which is below the limit values determined by ICNIRP and BTK. In measurement locations that are in line of sight with the base stations, the RF-EMF value changes according to the measurement time. The RF-EMF value measured in the afternoon is about 32% higher than at night. Statistical analysis of data showed that the long-term RF-EMF can be best expressed by Burr distribution. Unlike the studies in the literature, the change of RF-EMF during the day was examined and a new mathematical model was proposed. With the proposed model, the change of 24-hour RF-EMF during the day in the home environment can be determined with accuracy of up to 95% without the need for measurement using only 6-hour RF-EMF value.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektromanyetik dalgalar (EMD) radyo/televizyon vericileri, baz istasyonları, kablosuz sistemler gibi pek çok insan yapımı kaynak tarafından üretilmekte ve etraflarında elektromanyetik alan (EMA) oluşturmaktadır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte günlük hayatımızda kablolu ve kablosuz sistemler her geçen gün daha fazla yer almaya başlamıştır. Kablosuz sistemler EMD temelinde çalışmakta olup etraflarında bir EMA oluştururlar. Hücresel sistemler en popüler kablosuz sistemlerden olup bu sistemlerin en temel yapıtaşı baz istasyonlarıdır. Hücresel sistem kullanıcılarının yüksek veri hızı gerektiren servislerine olan taleplerinin artması, her bir baz istasyonunun sınırlı bir coğrafi bölgeye hizmet verebilmesi baz istasyonu sayısının artmasına neden olmaktadır. Her baz istasyonu bir EMA kaynağı olup, baz istasyonlarındaki artış maruz kalınan EMA seviyelerinin de artırmaktadır. Her ne kadar baz istasyonları iyonize etmeyen frekansları (300 GHz'in altı) kullansalar da baz istasyonu kaynaklı EMA'nın canlı sağlığına etkileri süregelen bir tartışma konusudur. Dolayısıyla baz istasyonlarının olası sağlık etkilerinin incelenmesi, yaydıkları EMA seviyelerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi insan sağlığı açısından elzemdir.

EMA'nın insan ve canlılar üzerine yaratabileceği olası etkilerden korunmak için belirlenen standartlar ve güvenlik amaçlı limit değerler mevcuttur. Bu limit değerler Uluslararası İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Komitesi (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) [1], Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) [2], Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) [3], Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC) [4], Avustralya Radyasyondan Korunma ve Nükleer Güvenlik Ajansı (The Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, ARPANSA) [5], Kanada Sağlık Örgütü (Health Canada) [6] gibi pek çok uluslararası kuruluş tarafından yayınlanmaktadır. Her ülke kendi limit değerlerini belirlemekte ve uygulamaktadır. ABD ve bazı Avrupa ülkeleri ICNIRP'nin oluşturduğu limit değerleri uygularken, İsviçre, İtalya, Polonya gibi bazı Avrupa ülkeleri ise limit değerler olarak ICNIRP'in belirlediğinden daha düşük değerleri uygulamaktadır. Türkiye'de yasal düzenlemeler Bilgi İletişim Teknolojileri Kurumu (BTK) yapılmakta olup BTK [7] ve ICNIRP [1] tarafından belirlenen limit değerlerinin %75 daha düşüğünü kullanmaktadır. Ortamın toplam elektrik alan şiddeti (E) için limit değerler ortamın 6 dakikalık ortalama ($E_{ort(6m)}$) değerini temsil etmektedir. BTK tarafından belirlenen limit değerler 800 MHz'de çalışan baz istasyonları için 29,1 V/m'dir. 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz ve 2600 MHz'de çalışan baz istasyonları için limit değerler sırasıyla 28,8 V/m, 40,72 V/m, 42,93 V/m ve 42,93 V/m'dir. Baz istasyonu kaynaklı radyofrekansı EMA (RF-EMA) seviyelerinin ölçülmesi, limit değerlere uygunluğunun kontrol edilmesi canlı sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle baz istasyonlarını doğrudan

gören ve uzun süreli maruziyetin yaşandığı ortamlarda RF-EMA değerlerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi günümüzün güncel çalışma konularındandır. Bu konu üzerine literatürde yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır [8-32]. Bu çalışmalarda özetle RF-EMA'nın kısa (short-term) ve uzun süreli (long-term) değişimleri ölçülüp farklı analizler yapılmıştır. Bu çalışmalar hakkında özet bilgiler kısaca şu şekildedir: Samsun şehir merkezinde baz istasyonunu gören iki farklı konumda bir gün boyunca RF-EMA ölçümleri alınarak değerlendirmeler yapılmıştır [8]. Elektrik alan şiddetinin değişimi 3. derece polinom yumuşatma (smoothing) algoritmaları var/yok iken değerlendirilmiştir [8]. Samsun'da bulunan bir alışveriş merkezinde bir hafta boyunca RF-EMA ölçümleri alınarak, değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirmelerde uzun süreli RF-EMA verisinin normal dağılımlı olmadığı sonucuna varılmıştır [9]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kurupelit kampüsünde iki yıl süresince kısa ve uzun süreli RF-EMA ölçümleri yapılarak RF-EMA'nın zamansal değişimi incelenmiştir [10]. Samsun, İlkadım ilçesinde bulunan 92 ilk ve orta dereceli okulda, dört farklı ayda kısa süreli RF-EMA ve uzun süreli RF-EMA ölçümleri alınarak RF-EMA'nın zamansal değişimi incelenmiştir [11]. Sabit bir konumda sekiz gün süresince kaydedilen RF-EMA verisine ait ilk yedi gün değerleri kullanılarak sekizinci gün değeri zaman seri analizi ile tahmin edilmiştir [12]. Konya ilinde ev ortamında bir hafta süresince kaydedilen RF-EMA'nın istatistiksel analizleri yapılmıştır [13]. Malatya şehir merkezinde sabit bir konumda beş hafta boyunca RF-EMA ölçümleri alınarak, RF-EMA'nın zamansal değişimi yapay sinir ağları kullanılarak modellenmiştir [14]. Sırbistan'da 664 baz istasyonu etrafında kapsamlı RF-EMA ölçümler ve değerlendirmeler yapılmıştır [15]. GSM ve UMTS baz istasyonları etrafında yapılan RF-EMA ölçümlerinde; RF-EMA'nın limit değerlerin %0,01 ile %10'u arasında değiştiği, ölçüm konumunun baz istasyona olan uzaklığın RF-EMA'yı etkileyen temel değişken olmadığı ifade edilmiştir [16]. Avrupa'da yapılan RF-EMA çalışmaları incelendiğinde; ortalama RF-EMA değerinin 0,08 V/m ile 1,8 V/m arasında değiştiği, ölçümlerin büyük çoğunluğu 1 V/m'nin altında olduğu, sadece %1'inin 6 V/m'nin üstünde olduğu, ölçülen RF-EMA'nın %60 oranında kablosuz haberleşme sistemleri kaynaklı olduğu görülmüştür [17]. Beş Avrupa ülkesinde (Belçika, İsviçre, Slovenya, Macaristan ve Hollanda) farklı ortamlarda (ev, toplu taşıma ve bina dışı ortam) maruz kalınan RF-EMA değeri kişisel maruziyet ölçer (personal exposure meters) ile kaydedilmiş ve analizler yapılmıştır. Sonuçlarından ev ortamında maruz kalınan RF-EMA değerinin ofis ve bina dışı ortamlara göre daha düşük olduğu görülmüştür [18]. Üç Avrupa ülkesinde (Belçika, Hollanda ve İsveç) 311 konumda (68 bina içi 243 bina dışı) RF-EMA ölçümleri yapılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlardan RF-EMA verisinin en iyi log-normal birikimli dağılımı fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) ile modellenebilir olduğu söylenmiştir [19]. 2000-2010 yılları arasında 5 kıta ve 23 ülkede yapılan 173.000 RF-EMA ölçüm sonuçları verilmiştir

[20]. İsviçre'nin 5 farklı şehrinde ve 51 farklı bina dışı ortamında RF-EMA ölçümleri yapılmış ve ölçülen RF-EMA değerlerinin %80 oranında baz istasyonu kaynaklı olduğu belirlenmiştir [21]. 2000-2015 yılları arasında yayınlanan RF-EMA ölçümleri ve sonuçları ilgili çalışmaların literatür özetleri verilmiştir [22]. Dört Avrupa şehrinde (Amsterdam, Basel, Gent, Brüksel) üç farklı bina dışı ortamda (merkezi, merkezi olmayan yaşam alanları ile şehir merkezi) RF-EMA ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarından RF-EMA değerlerinin %95'nin 0,46 V/m ile 0,82 V/m arasında olduğu görülmüştür [23]. Basel, Gent ve Brüksel'de 2011-2012 yılları arasında bina dışı, bina içi ve toplu taşıma araçlarında RF-EMA ölçümleri yapılmış ve ölçüm konumlarındaki RF-EMA değerleri doğrusal regresyon modelleri ile analiz edilmiştir [24]. Basel ve Amsterdam'da dört farklı şehir merkezinde taşınabilir RF-EMA ölçer kullanılarak 12 gün boyunca maruz kalınan RF-EMA değerleri kaydedilmiştir. Sonuçlardan baz istasyonu kaynaklı RF-EMA maruziyetinin 0,09 V/m ile 0,53 V/m arasında değiştiği görülmüştür [25]. Belçika'da bulunan okul, ev ve halka açık şehir merkezlerinde yapılan RF-EMA ölçüm sonuçlarından RF-EMA seviyesinin %94'ünün 1 V/m'nin altında olduğu, ortalama RF-EMA değerinin ise 0,1 V/m ile 3,3 V/m arasında değiştiği görülmüştür [26]. Bir yıldan fazla sürede kaydedilen RF-EMA verileri analiz edilerek zamansal bir model önerilmiştir [27]. Ankara'da sabit bir konumda ve GSM baz istasyonu etrafında günlük, haftalık ve 4 aylık RF-EMA ölçümleri alınarak analizler yapılmıştır. Sonuçlardan RF-EMA seviyesinin 1,18 V/m ile 2,36 V/m arasında değiştiği, uzun süreli ölçüm sonuçları kullanıcının trafiğinin RF-EMA seviyesi %35 ve %50 oranında etkilediği görülmüştür [28]. GSM verici antene yakın yerlerde yaşayanların maruz kaldıkları RF-EMA seviyelerine değerlendirmek için 2010 ile 2012 yılları arasında toplamda 412 konumda RF-EMA ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarından RF-EMA değerlerinin %97'sinin 5 V/m'nin, %92'sinin ise 2 V/m'nin altında olduğu belirlenmiştir [29]. Belçika'nın Gent şehir merkezinde 1 km²'lik alan içinde bina dışı ortamda 650 RF-EMA ölçümü yapılmış ve en yüksek RF-EMA'nın 1,3 V/m ile 3,1 V/m arasında değiştiği görülmüştür. 900 MHz frekansında çalışan GSM baz istasyonlarının ortamdaki toplam RF-EMA'ya katkıları %45 ile %100 arasında değişmektedir. Ayrıca yine bu çalışmada RF-EMA seviyelerinin değerlendirilmesi için yeni bir ısı haritası yöntemi önerilmiştir [30]. Hollanda'nın Amsterdam

şehrinde beş farklı bina dışı ortamda ve 2 km uzunluğundaki bir hat boyunca RF-EMA'nın değişimi modellenmiştir [31]. Marmara Üniversitesi, Göztepe Kampüsünde 44 farklı konumda kısa süreli bir konumda ise uzun süreli (24 saat) RF-EMA ölçümleri alınmıştır. Bina dışı ortamda RF-EMA değeri 2 V/m ile 2,5 V/m arasında, bina içi ortamda (kız öğrenci yurdunda) ise bu değer 1,7 V/m ile 2 V/m arasında değişmektedir. 24 saatlik ölçümlerde gündüz ve akşam saatlerinde RF-EMA 1,18 V/m ile 1,28 V/m arasında değişirken, gece bu değer 1,1 V/m'lere düşmektedir [32].

Bu çalışmada baz istasyonu kaynaklı EMA seviyelerinin uzun süreli ölçülmesi ve değerlendirilmesi için 2017 ve 2018 yılları arasında baz istasyonlarını doğrudan gören 40 farklı ev ortamında 24 saat süreli RF-EMA ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ilk önce analiz edilerek BTK tarafından belirlenen limit değerleri ile uyumluluğu kontrol edilmiştir. Sonrasında gün içinde maruz kalınan RF-EMA'nın değişimi ve RF-EMA verilerinin en iyi hangi dağılım ile modellenebilir olduğunun incelenmiştir. Ayrıca gün içindeki RF-EMA'nın değişimi yeni bir matematiksel model ile ifade edilmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak gün içindeki RF-EMA'nın değişimini veren modelin katsayıları 6 saatlik RF-EMA verileri kullanılarak tahmin edilmiştir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: II. Bölümde RF-EMA ölçümlerin alınmasına yönelik materyal ve yöntem bilgileri verilirken, III. Bölümde RF-EMA ölçüm sonuçları ve gün içindeki RF-EMA'nın değişimine ait analizleri verilmiştir. IV. Bölümde ilk olarak RF-EMA verilerinin istatistiksel analizleri yapılmış sonrasında ise gün içindeki RF-EMA'nın değişimi modellenerek model katsayıları belirlenmiştir. Makale V. Bölüm olan Sonuçlar bölümü ile sonlandırılmıştır.

2. RF-EMA ÖLÇÜMLERİ (RF-EMF MEASUREMENTS)

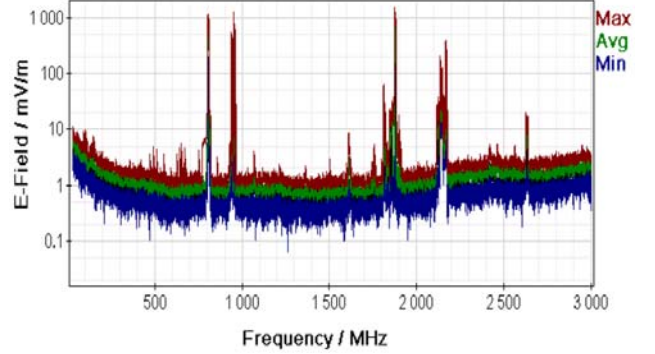
Bu çalışmada ev ortamında RF-EMA değerinin gün içindeki değişimini incelemek ve modellemek için Ordu şehir merkezinde toplam 40 farklı konumda 2017 ile 2018 yılları arasında 100 kHz- 3 GHz frekans aralığında 24 saat süreli RF-EMA ölçümleri yapılmıştır. Uzun süreli RF-EMA ölçümlerine ait görseller Şekil 1'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi RF-EMA ölçümü yapılan konumlarda bir veya birden fazla baz istasyonu bulunabilmektedir.



Şekil 1. Uzun süreli RF-EMA ölçüm örnekleri (Examples of long-term RF-EMF measurements)

Uzun süreli RF-EMA ölçümleri izotropik EP-330 elektrik alan probu PMM-8053 EMA ölçer [33] (kalibrasyon no: 16040472, kalibrasyon tarihi başlangıç: 04/2016, bitiş: 04/2018) ile alınmıştır. PMM-8053'in algılayıcı ölçüm aralığı 0,3 V/m- 300 V/m olup, 100 kHz ile 3 GHz arasındaki frekans aralığındaki toplam elektrik alan şiddetini (V/m), manyetik alan şiddetini (A/m), güç akış yoğunluğunu (W/m^2), bunların zamansal ve konumsal ortalamasını, maksimum ve minimum değerlerini ölçülebilmektedir. RF-EMA ölçüm konumları etrafında bulunan baz istasyonları doğrudan görece şekilde seçilmiştir. Ölçüm konumları ile baz istasyonları arası mesafe 50 m ile 100 m arasında değişmektedir. RF-EMA ölçümlerine sabah 06:00'da başlanmış ve ertesi gün 06:00'da sonlandırılmıştır. Gün içindeki RF-EMA'nin değişimi 5sn aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Ortamda bulunan RF-EMA'yi oluşturan temel kaynakları belirlemek için ise SRM-3006 bant seçici EMA ölçer [34] (3501/03 izotropik elektrik alan probu, kalibrasyon no: 17010011, kalibrasyon tarihi başlangıç: 01/2017, bitiş: 01/2019) kullanılmıştır. SRM-3006 ile alınan bir spektrum örneği Şekil 2'de, 30 MHz- 3 GHz frekans spektrumunda yerleşen servisler ise Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi verilen ortamdaki toplam RF-EMA'yi oluşturan temel kaynaklar 800 MHz (LTE800), 900 MHz (GSM900), 1800 MHz (GSM1800), 2100 MHz (UMTS2100) ve 2600 MHz (LTE2600) frekans bantlarını kullanan baz istasyonlarıdır. Baz istasyonlarının toplam RF-EMA'ya katkısı %99,6 olup, aralarında en büyük pay %37,5 ile 1800 MHz (GSM1800) frekans bandını kullanan baz istasyonlarıdır. Baz istasyonlarının %99,6'lık katkısı

literatürdeki benzer değerler ile karşılaştırıldığında [16, 20]'deki değerlere (%60 ve %80) göre daha yüksek, [29] ile (%45 ile %100 arasında) ise uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 2. 30 MHz -3 GHz arası spektrum örneği
(A spectrum sample from 30 MHz to 3 GHz)

3.ÖLÇÜM SONUÇLARI (MEASUREMENT RESULTS)

40 farklı ev ortamında 5 sn aralıklarla ve 24 saat süresince 100 kHz – 3 GHz arasında kaydedilen RF-EMA değerlerinin ($E_{5s,24h}$) gün içindeki değişimleri Şekil 3'de verilmiştir. Genel olarak ortamdaki RF-EMA değeri sabah saatlerinden itibaren artmakta öğlen ve akşam saatlerinde en yüksek değerlerine ulaşmakta geceden sonra ise azalmaktadır. RF-EMA ölçümlerine ait detaylı istatistiksel değerlendirmeler Tablo 2'de verilmiştir. Gerek Şekil 3'de gerekse Tablo 2'den de görüldüğü gibi en yüksek RF-EMA değeri 19. ölçüm konumunda (K19) ($E_{mak(K19,5s,24h)}$) 17,31 V/m olarak

Tablo 1. Bant seçici RF-EMA değerleri (Band selective RF-EMF values)

| İndeks | Servis Adı | Alt Frekans | Üst Frekans | E (V/m) |
|--------|---------------|-------------|-------------|---------|
| 1 | Low Band | 30 MHz | 87,5 MHz | 0,042 |
| 2 | FM Band | 87,5 MHz | 108 MHz | 0,017 |
| 3 | Air Band | 108,1 MHz | 136 MHz | 0,022 |
| 4 | Land Band-I | 136,1 MHz | 173 MHz | 0,014 |
| 5 | TV VHF Band | 173,1 MHz | 230 MHz | 0,016 |
| 6 | Land Band-II | 230,1 MHz | 400 MHz | 0,024 |
| 7 | Land Band-III | 400,1 MHz | 470 MHz | 0,014 |
| 8 | TV UHF Band | 470,1 MHz | 790,9 MHz | 0,018 |
| 9 | LTE800 | 791 MHz | 820,9 MHz | 1,049 |
| 10 | ETC1 | 821 MHz | 925 MHz | 0,012 |
| 11 | LTE900 | 925,1 MHz | 935,1 MHz | 0,085 |
| 12 | GSM900 | 935,1 MHz | 961,0 MHz | 0,968 |
| 13 | ETC2 | 961,1 MHz | 1,805 GHz | 0,030 |
| 14 | GSM1800 | 1,805 GHz | 1,820 GHz | 1,152 |
| 15 | LTE1800 | 1,820 MHz | 1,879 MHz | 0,092 |
| 16 | DECT | 1,880 GHz | 1,899 GHz | 0,048 |
| 17 | ETC3 | 1,899 GHz | 2,010 GHz | 0,016 |
| 18 | UMTS2100 | 2,010 GHz | 2,170 GHz | 0,385 |
| 19 | ETC4 | 2,171 GHz | 2,399 GHz | 0,031 |
| 20 | WLAN | 2,400 GHz | 2,483 GHz | 0,045 |
| 21 | ETC5 | 2,484 GHz | 2,569 GHz | 0,022 |
| 22 | LTE2600 | 2,570 GHz | 2,670 GHz | 0,062 |
| 23 | ETC6 | 2,671 GHz | 3,000 GHz | 0,048 |
| 24 | Toplam | | | 1,883 |

Tablo 2. Uzun süreli RF-EMA ölçümlerinin istatistiksel değerlendirilmesi
(Statistics assessments for long-term RF-EMF measurements)

| Konum | $E_{\text{mak}}(5s,24h)$ | $E_{\text{ort}}(5s,24h)$ | $E_{\text{ss}}(5s,24h)$ | Konum | $E_{\text{mak}}(5s,24h)$ | $E_{\text{ort}}(5s,24h)$ | $E_{\text{ss}}(5s,24h)$ |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| K1 | 9,65 | 6,03 | 1,44 | K21 | 2,07 | 1,79 | 0,11 |
| K2 | 5,06 | 3,85 | 0,50 | K22 | 16,47 | 14,16 | 0,44 |
| K3 | 3,13 | 1,97 | 0,33 | K23 | 3,66 | 2,62 | 0,44 |
| K4 | 5,16 | 3,06 | 0,97 | K24 | 2,25 | 1,53 | 0,24 |
| K5 | 1,45 | 1,02 | 0,20 | K25 | 24,2 | 1,68 | 0,22 |
| K6 | 4,56 | 2,38 | 0,43 | K26 | 3,16 | 1,28 | 0,66 |
| K7 | 12,08 | 8,45 | 1,36 | K27 | 3,19 | 2,30 | 0,45 |
| K8 | 3,10 | 1,28 | 0,35 | K28 | 1,32 | 0,93 | 0,16 |
| K9 | 2,94 | 2,02 | 0,28 | K29 | 2,89 | 1,82 | 0,32 |
| K10 | 3,85 | 2,73 | 0,38 | K30 | 2,66 | 1,78 | 0,37 |
| K11 | 2,63 | 1,76 | 0,27 | K31 | 2,40 | 1,51 | 0,30 |
| K12 | 6,21 | 3,49 | 0,90 | K32 | 1,20 | 0,88 | 0,14 |
| K13 | 4,67 | 2,71 | 0,77 | K33 | 1,17 | 0,72 | 0,13 |
| K14 | 10,54 | 6,13 | 1,34 | K34 | 2,12 | 1,40 | 0,17 |
| K15 | 3,13 | 2,25 | 0,29 | K35 | 1,48 | 0,84 | 0,23 |
| K16 | 2,34 | 1,65 | 0,29 | K36 | 3,77 | 1,81 | 0,77 |
| K17 | 2,17 | 1,38 | 0,22 | K37 | 0,80 | 0,39 | 0,08 |
| K18 | 2,5 | 1,36 | 0,37 | K38 | 2,99 | 2,20 | 0,39 |
| K19 | 17,31 | 7,32 | 2,29 | K39 | 2,02 | 1,26 | 0,30 |
| K20 | 4,78 | 2,96 | 0,40 | K40 | 1,00 | 0,64 | 0,09 |

kaydedilmiştir. 24 saatlik E ölçümlerinin ortalaması ($E_{\text{ort}}(K22,5s,24h)$) ise en yüksek 14,16 V/m olarak K22'de hesaplanmıştır.

Çalışmanın geri kalanı için elektrik alan şiddetinin değerlendirilmesinde genel olarak E_A (B, C, D) kısaltma sistematığı kullanılmıştır.

Burada;

- Değerlendirme yöntemini göstermektedir (mak: maksimum, ort: ortalama, ss: standart sapma)
- Değerlendirilen konumu göstermektedir (konum: belirsiz konumu, K1: 1. ölçüm konumu, T: tüm ölçüm konumları)
- Değerlendirmenin hangi aralıkla yapıldığını göstermektedir (5 saniye (5s), altı dakika (6m), altı saat (6h))
- Toplam ölçüm süresini göstermektedir (24 saat (24h), 12 saat (12h))

Örneğin $E_{\text{ort}}(K25,6m,24h)$, 25 nolu konumda, 24 saat süresince kaydedilen, her 6 dakika süresince ortalaması alınan E'nin değişimini göstermektedir.

Uzun süreli RF-EMA ölçümlerini ICNIRP ve BTK tarafından belirlenen limit değerler ile karşılaştırmak için 5sn aralıklarla ölçülen RF-EMA değerleri ($E_{5s,24h}$) 6 dakikalık periyod boyunca ortalamaları ($E_{\text{ort}}(\text{konum},6m,24h)$) alınmış ve sonuçlar Şekil 4'de verilmiştir. Ayrıca 6 dakikalık ortalama RF-EMA değerlerine ait istatistiksel değerlendirmeler de Tablo 3'de gösterilmiştir. Tablo 3'de görüldüğü gibi 6 dakikalık ortalama RF-EMA verisi içinde en yüksek $E_{\text{ort}}(K22,6m,24h)$ değeri 15,74 V/m olarak K22'de kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değer 100 kHz-3 GHz arası için ICNIRP ve BTK tarafından verilen limit değerlerin altındadır. Bu değer 100 kHz- 3GHz frekans aralığında

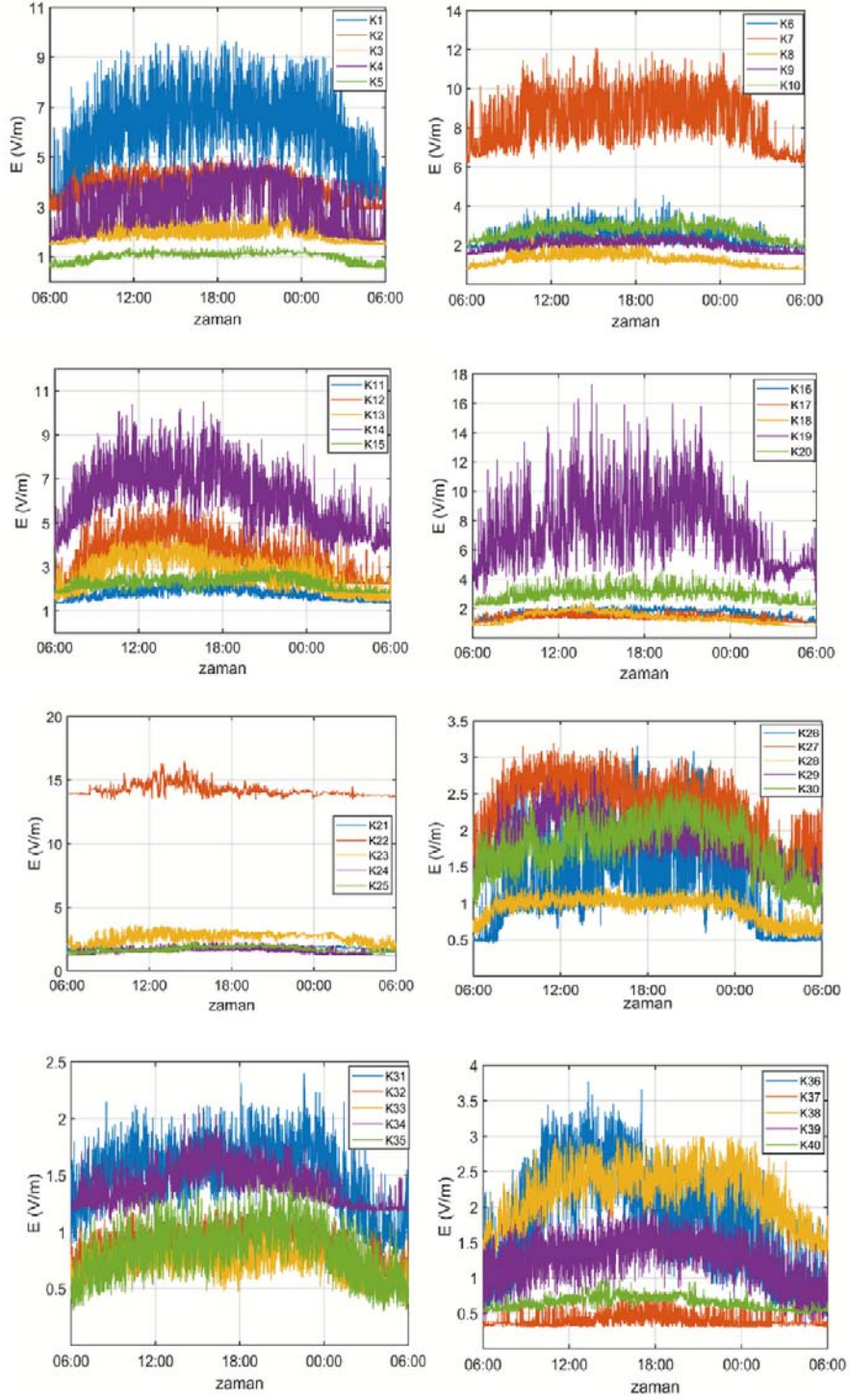
ICNIRP için en düşük limit değer olan 28 V/m'dan %43,78 daha düşüktür. BTK için en düşük limit değer olan 21 V/m'den %25 daha düşüktür. Bu değer [16]'daki çalışma için yaklaşık %10 düzeyindedir.

Gün içindeki RF-EMA'nın değişimini daha detaylı analiz edebilmek için gün dört farklı zaman dilimine (sabah, öğlen, akşam ve gece) bölünmüş ($E_{\text{ort}}(\text{konum},6h,24h)$) ve değerlendirmeler bu zaman dilimleri için yapılmıştır. Sabah 06:00-12:00 arasını gösterirken öğlen 12:00-18:00 arasını göstermektedir. Akşam ve gece ise sırasıyla 18:00-00:00 ve 00:00-06:00 arasını göstermektedir. 40 farklı konumda kaydedilen RF-EMA'nın dört farklı zaman dilimindeki değişimleri Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'den de görüldüğü gibi öğlen ve akşam zaman dilimlerinde maruz kalınan RF-EMA değeri sabah ve gece saatlerin göre daha yüksektir. Tüm ölçümlerinin ortalaması alındığında sabah zaman diliminde maruz kalınan RF-EMA değeri 2,5117 V/m'dir. Öğlen, akşam ve gece zaman diliminde ise bu değerler sırasıyla 2,9358 V/m, 2,8553 V/m ve 2,2255 V/m'dir. Ev ortamında en yüksek maruziyet öğlen zaman diliminde yaşanırken en düşük maruziyet ise gece saatlerinde yaşanmaktadır. Öğlen saatlerinde ölçülen RF-EMA değeri gece saatlerine göre yaklaşık %32 daha fazladır. Aynı değişim [32]'de yapılan çalışmada için yaklaşık %15, [27] için ise %35-%50 aralığındadır.

4. ANALİZLER (ANALYSIS)

4.1. Uzun Süreli RF-EMA'nın Dağılımının Belirlenmesi (Distribution of Long Term RF-EMA)

6 dakikalık ve 24 saatlik RF-EMA verisini ($E_{\text{ort}}(T,6m,24h)$) daha detaylı analiz etmek adına birikimli dağılım fonksiyonu

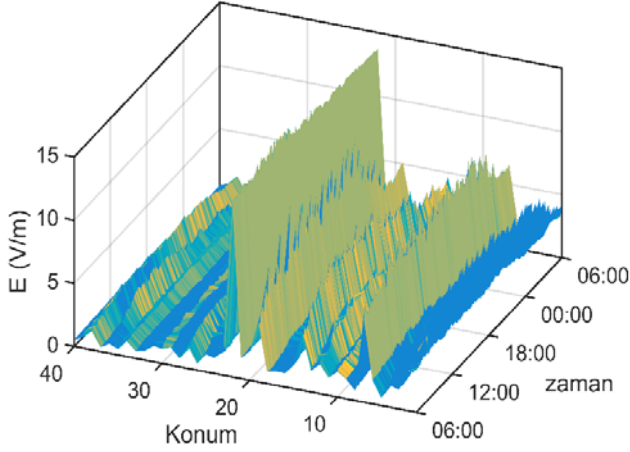


Şekil 3. 40 farklı ev ortamında gün içindeki RF-EMA'nın değişimi
(Change of RF-EMF during a day in 40 different home environments)

(BDF) elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da uzun süreli RF-EMA verisine ait BDF ifadesinin en iyi hangi fonksiyon ile ifade edilebilir olduğunun analiz sonuçları da gösterilmiştir. RF-EMA verisine ait BDF ifadeleri incelendiğinde; Burr dağılımının [19]'de ifade edilen lognormal dağılımından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Şekil 6'da verilen birikimli dağılım fonksiyonu

incelendiğinde ölçüm konumlarında kaydedilen RF-EMA verisinin yarısı 1,844 V/m'nin altındadır. Ölçülen RF-EMA değerinin sadece %3'ü 10 V/m'nin üzerindedir. Ölçüm verilerinin %75'i 2,77 V/m'den düşüktür. %90 ve %95 için ise ölçüm verileri sırasıyla 5,95 V/m ve 8,11 V/m'den daha düşüktür. Ölçülen RF-EMA değerleri [17, 23, 26, 29] çalışmalarındaki BDF sonuçları ile karşılaştırıldığında RF-

EMA seviyelerinin daha yüksek düzeyde olduğu söylenebilir. Ölçüm verileri daha düşük değerleri limit olarak belirleyen ülke değerleri ile karşılaştırıldığında (örn. İsviçre 5 V/m, İtalya 6 V/m, Polonya 7 V/m) ölçüm değerlerinin %88,9'unda RF-EMA değeri 5 V/m'nin, %90,1'inde 6 V/m'nin, %92,7'sinde ise 7 V/m'nin üzerindedir.



Şekil 4. 6 dakikalık ortalama RF-EMA'nın gün içindeki değişimi
(Change of RF-EMF during a day for 6 minute period)

Uzun süreli RF-EMA verilerinin dağılımını incelemek ve en iyi hangi dağılım ile en iyi ifade edilebilir olduğunu belirlemek için detaylı analizler yapılmıştır. RF-EMA verisi için en iyi dağılımı bulmak adına farklı tür dağılım yöntemleri (örn. Normal, Lognormal, Rayleigh vb.) RF-

EMA verisine uygulanmış ve olasılık yoğunluk fonksiyonları (probability density function, PDF) Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde 40 farklı konumda 24 saat süresince ölçülen elektrik alan şiddeti değerleri dağılımlarının [29]'de yapılan çalışma sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının (OYF) gerçek dağılım değeri ile tahmin edilen dağılım değeri arasındaki karşılaştırma normalize hata karelerinin ortalamasının karekökü (normalized root mean square error, NRMSE) cinsinden yapılmıştır. Normalize hata karelerinin ortalamasının karekökü (NHKOK) Eş. 1'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\text{NHKOK} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \hat{E}_i)^2}}{\max(E) - \min(E)} \quad (1)$$

Burada E_i ölçülen E değerini, \hat{E}_i tahmin edilen E değerini, i ölçüm zamanı/örneğini ve N toplam ölçüm sayısını göstermektedir.

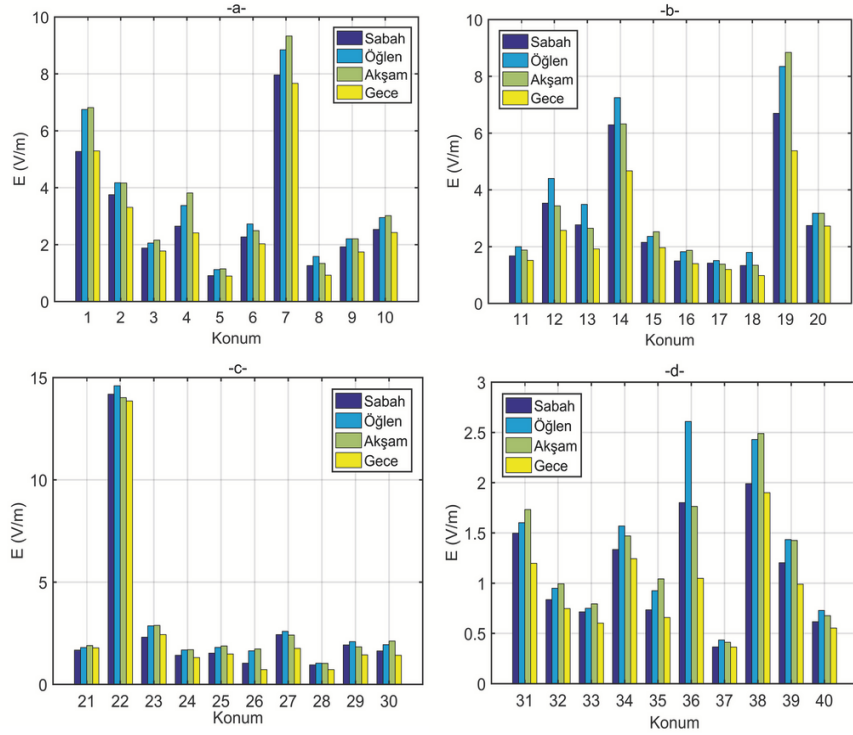
Yapılan analizler sonucunda uzun süreli RF-EMA verisinin en iyi Burr dağılım ile ifade edilebilir olduğu görülmüştür. Burr dağılımı için hesaplanan NHKOK değeri 0,0627'dir. Normal dağılım için NHKOK değeri 0,1449 iken, Lognormal, Rayleigh, Weibull için bu değerler 0,0673, 0,1510, 0,0904'dır. "Burr" dağılımının matematiksel ifadesi Eş. 2'de verilmiştir.

$$f(x; \alpha, c, k) = \frac{\frac{kc}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1}}{\left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right)^{k+1}} ; x > 0, \alpha > 0, c > 0, k > 0 \quad (2)$$

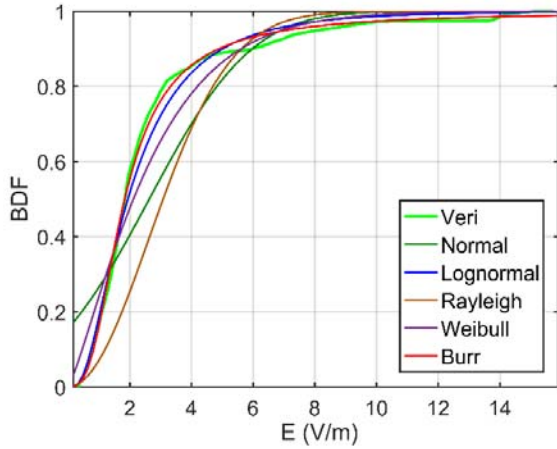
Burada $\alpha = 2,39992 \cdot 10^{-5}$, $k = 3,46302 \cdot 10^{-5}$, $c = 1,73572 \cdot 10^{-5}$

Tablo 3. 6 dakika ortalama RF-EMA'nın istatistiksel değerleri (Statistical values of 6-minute average RF-EMF)

| Konum | $E_{\max}(6m,24h)$ | $E_{\text{ort}}(6m,24h)$ | $E_{\text{ss}}(6m,24h)$ | Konum | $E_{\max}(6m,24h)$ | $E_{\text{ort}}(6m,24h)$ | $E_{\text{ss}}(6m,24h)$ |
|-------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| K1 | 8,06 | 6,03 | 1,15 | K21 | 1,94 | 1,79 | 0,10 |
| K2 | 4,52 | 3,85 | 0,45 | K22 | 15,74 | 14,16 | 0,40 |
| K3 | 2,58 | 1,97 | 0,25 | K23 | 3,24 | 2,62 | 0,38 |
| K4 | 4,64 | 3,06 | 0,75 | K24 | 1,90 | 1,53 | 0,20 |
| K5 | 1,21 | 1,02 | 0,19 | K25 | 2,19 | 1,68 | 0,20 |
| K6 | 3,35 | 2,38 | 0,33 | K26 | 2,80 | 1,28 | 0,54 |
| K7 | 10,59 | 8,45 | 1,08 | K27 | 2,84 | 2,30 | 0,40 |
| K8 | 2,03 | 1,28 | 0,30 | K28 | 1,10 | 0,93 | 0,15 |
| K9 | 2,40 | 2,02 | 0,24 | K29 | 2,42 | 1,82 | 0,30 |
| K10 | 3,38 | 2,73 | 0,35 | K30 | 2,42 | 1,78 | 0,34 |
| K11 | 2,21 | 1,76 | 0,23 | K31 | 1,94 | 1,51 | 0,25 |
| K12 | 5,25 | 3,49 | 0,80 | K32 | 1,08 | 0,88 | 0,12 |
| K13 | 4,00 | 2,71 | 0,70 | K33 | 0,95 | 0,72 | 0,10 |
| K14 | 8,67 | 6,13 | 1,15 | K34 | 1,77 | 1,40 | 0,15 |
| K15 | 2,85 | 2,25 | 0,25 | K35 | 1,23 | 0,84 | 0,19 |
| K16 | 2,10 | 1,65 | 0,27 | K36 | 3,12 | 1,81 | 0,70 |
| K17 | 1,88 | 1,38 | 0,17 | K37 | 0,55 | 0,39 | 0,05 |
| K18 | 2,10 | 1,36 | 0,36 | K38 | 2,85 | 2,20 | 0,35 |
| K19 | 11,32 | 7,32 | 1,84 | K39 | 1,64 | 1,26 | 0,23 |
| K20 | 3,51 | 2,96 | 0,32 | K40 | 0,80 | 0,64 | 0,08 |



Şekil 5. Dört farklı zaman dilimi ve a) 1-10, b) 11-20, c) 21-30, d) 31-40 arası konumlar için ortalama E değerleri
(Average E values for four different time intervals and locations between a) 1-10, b) 11-20, c) 21-30, d) 31-40)

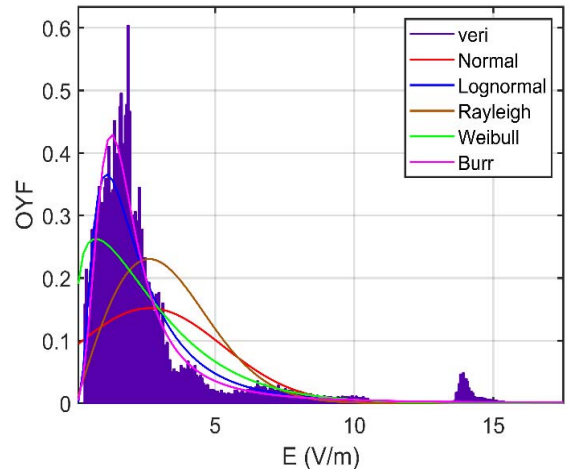


Şekil 6. 6 dakikalık ortalama RF-EMA için BDF değerleri
(CDF values for 6-minute average RF-EMA)

4.2. Uzun Süreli RF-EMA'nın Modellenmesi (Modeling of Long Term RF-EMA)

40 farklı ev ortamında ölçülen tüm RF-EMA değerlerinin ($E_{ort(konum,6m,24h)}$) ortalaması alınmış ($E_{ort(T,6m,24h)}$) ve E'nin gün içindeki değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Hesaplanan en yüksek ($E_{ort(T,6m,24h)}$) değeri ($E_{mak(ort,T,6m,24h)}$) 3,073 V/m, ortalama $E_{ort,T,6m,24h}$ değeri ($E_{ort(ort,T,6m,24h)}$) 2,6336 V/m ve E'nin standart sapması ($E_{ss(ort,T,6m,24h)}$) 0,3423 V/m'dir. Ortalama E'nin gün içindeki değişimini modellemek ve matematiksel bir ifade elde etmek için RF-EMA verisine farklı tür eğri uydurma yöntemleri uygulanmıştır. Gerek

sadeliğe gerekirse doğruluk açısından 2. dereceden polinom seçilerek ortalama E verisi Eş. 3'de verildiği gibi ifade edilmiştir. Gerçek RF-EMA verisi ile 2. dereceden polinom uydurularak tahmin edilen RF-EMA verisi arasındaki NHHKOK hatası 0,0713'dir. Uydurulan eğri için polinomun derecesi 9'a çıktığında NHHKOK değeri 0,0346'lara kadar düşülebilmektedir. Ancak bu durumda RF-EMA verisini ifade etmek karmaşık bir hal aldığından bu çalışmada kullanılmamıştır.



Şekil 7. RF-EMA'ya ait OYF değerleri
(PDF values of RF-EMA)

$$E_p(\varnothing) = P_1 \times \varnothing^2 + P_2 \times \varnothing + P_3 \quad (3)$$

$$\text{Burada } \emptyset = 1 + \frac{\text{zaman}-06:00}{6},$$

$$P_1 = -7,353 \times 10^{-5}, P_2 = 0,01622, P_3 = 2,0991$$

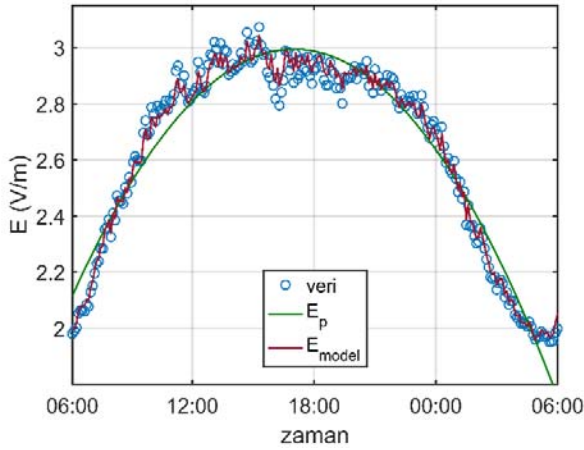
RF-EMA'nın gün içindeki değişim modeli doğruluğunu artırmak için [27] tarafından önerilen matematiksel ifade (β_{model}) dikkate alınarak Eş. 3 ve Eş. 4'deki gibi güncellenebilir.

$$E_{\text{model}}(\emptyset) = E_p(\emptyset) + \beta_{\text{model}}(\emptyset) \quad (4)$$

Burada,

$$\beta_{\text{model}}(\emptyset) = \left(\frac{E(\emptyset)^2 - E_T(\emptyset)^2}{E_p(\emptyset)^2} \right), \text{dir [27].}$$

Şekil 8'den de görüldüğü gibi E_{model} ifadesi ile RF-EMA'nın gün içindeki değişimi polinom ifadesine (E_p) göre çok daha doğru bir şekilde modellenebilmektedir. Gerçek RF-EMA değerleri ile E_{model} 'in ürettiği RF-EMA arasındaki NHKOK değeri 0,0173'dür. Bu ise Eş. 4 kullanılarak gün içindeki RF-EMA'nın değişiminin %98'in üzerinde bir doğruluk ile belirlenebileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 8. Ortalama RF-EMA'nın zamanla değişimi
(Variation of mean RF-EMF by time)

RF-EMA'nın gün içindeki değişimini veren Eş. 3'deki 2. dereceden polinom katsayıları (P_1 , P_2 ve P_3) ile 40 farklı konumda ölçülen $E_{\text{mak(ort,T,6m,24h)}}$, $E_{\text{ort(mean,T,6m,24h)}}$ ve $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$ değerleri arasında bir ilişkinin olup olmadığı incelenmiştir. Polinom katsayıları ile $E_{\text{mak(ort,T,6m,24h)}}$, $E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}$ ve $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$ değerleri arasındaki korelasyon katsayıları (corelation coefficient, CC) hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'den görüldüğü gibi P_1 katsayısı ile en yüksek korelasyon E_{ss} arasında olup korelasyonun değeri -0,9844'dür. P_2 içinde en yüksek korelasyon E_{ss} arasında iken P_3 için ise en yüksek korelasyon E_{ort} değeri arasındadır.

P_1 ve P_2 için en yüksek korelasyon katsayısı (KK) $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$, P_3 için ise $E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}$ arasında olduğu belirlendikten sonra; P_1 ve P_2 için $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$ arasında, P_3 için ise $E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}$ arasındaki matematiksel ilişki doğrusal

regresyon analizi ile ifade edilmiştir. Bağımlı değişken y , bağımsız değişken x ile verilen bir doğrusal regresyon modeli Eş. 5'de verilmiştir.

Tablo 4. P_1 , P_2 , P_3 katsayıları ile $E_{\text{mak(ort,T,6m,24h)}}$, $E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}$ ve $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$ arasındaki korelasyon katsayıları

(Correlation coefficients between P_1 , P_2 , P_3 coefficients and E_{max} (mean, all, 6m, 24h), E_{avg} (mean, all, 6m, 24h) and E_{std} (mean, all, 6m, 24h))

| | $E_{\text{mak(ort,T,6m,24h)}}$ | $E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}$ | $E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}$ |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| P_1 | -0,6741 | -0,5438 | -0,9844 |
| P_2 | 0,6542 | 0,5286 | 0,9602 |
| P_3 | 0,9356 | 0,9788 | 0,4576 |

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Burada β regresyon katsayıları, n veri setinin boyutu, ε_i ise hata terimidir.

Eş. 5 Eş. 6'da verildiği gibi güncellenebilir.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

Eş. 6 eşitliği matris biçiminde Eş. 7'deki gibi yazılabilir.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

Regresyon katsayıları Eş. 8'deki gibi hesaplanabilir.

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

40 farklı RF-EMA verisi için regresyon analizi yapıldıktan sonra P_1 Eş. 9'da P_2 Eş. 10'da ve P_3 Eş. 11'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$P_1 = -2 \times 10^{-6} - 0,1746 \times 10^{-3} \times (E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}) \quad (9)$$

$$P_2 = 0,0004 + 0,0387 \times (E_{\text{ss(ort,T,6m,24h)}}) \quad (10)$$

$$P_3 = -0,2719 + 0,09003 \times (E_{\text{ort(ort,T,6m,24h)}}) \quad (11)$$

P_1 , P_2 ve P_3 polinom katsayıları kullanılarak RF-EMA'nın gün içindeki değişimini modelleyen ($E_{p,T}$) 2. derece polinom ifadesi Eş. 12'deki gibi yazılabilir.

$$E_{p,T}(\emptyset) = P_1 \times \emptyset^2 + P_2 \times \emptyset + P_3 \quad (12)$$

Eş. 12'ye [27]'de önerilen ifade (β_{model}) eklenerek RF-EMA'nın gün içindeki değişimini tahmin eden model güncellenebilir.

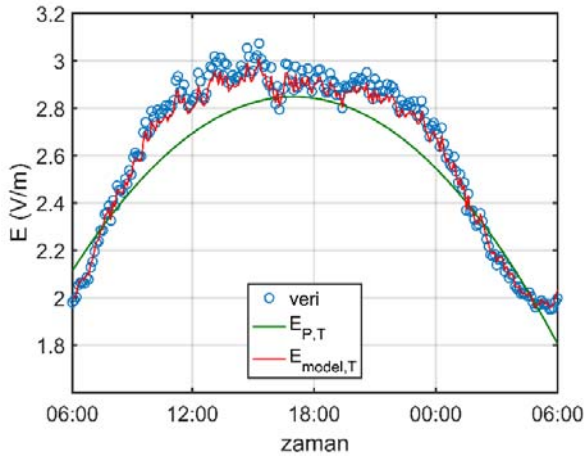
$$E_{\text{model,T}}(\emptyset) = E_{p,T}(\emptyset) + \beta_{\text{model,T}}(\emptyset) \quad (13)$$

Önerilen Eş. 13'ün doğruluğunu test etmek adına ilk önce 40 farklı ortam için elde edilen RF-EMA değerinin ortalamaları

alınmış sonra Eş. 9, Eş. 10, Eş. 11 eşitlikleri kullanılarak P_1 , P_2 ve P_3 değerleri hesaplanmış ve RF-EMA'nın gün içinde değişimi veren Eş. 12 eşitliği Eş. 14'de verildiği gibi düzenlenmiştir.

$$E_{P,T}(\emptyset) = -\frac{6,1766}{10^5} \times \emptyset^2 + 0,0136 \times \emptyset + 2,0991 \quad (14)$$

Eş. 14'de Eş. 13'deki gibi β_{model} ifadesi eklenerek $E_{\text{model},T}(\emptyset)$ elde edilmiştir. 40 farklı ortam için ortalama RF-EMA verisi, $E_{P,T}$ ve $E_{\text{model},T}$ ifadelerinin zamana bağlı gün içindeki değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gerçek RF-EMA değeri ile $E_{\text{model},T}$ kullanılarak tahmin edilen RF-EMA değeri birbirine oldukça yakındır. Gerçek RF-EMA değerleri ile tahmin edilen değerler arasındaki NHHOK değeri 0,0260'dır. Bu ise $E_{\text{model},T}$ kullanılarak ortamdaki RF-EMA'nın %97,4 doğruluk ile tahmin edilebileceği anlamına gelmektedir. Şekil 9'da verilen E_{model} (%98,27) ile polinom katsayıları tahmin edilerek yeniden düzenlenen $E_{\text{model},T}$ (%97,4) arasındaki RF-EMA tahmin doğruluğu %1'den daha azdır.



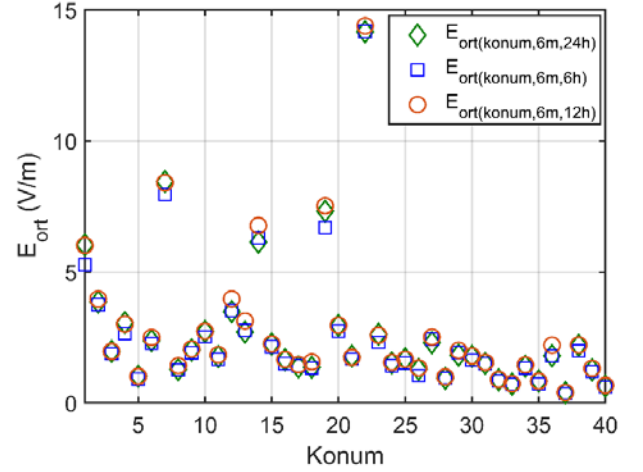
Şekil 9. Ortalama RF-EMA'nın zamanla değişimi
(Variation of mean RF-EMF by time)

Çalışmanın son aşamasında 24 saat süreli $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ ve $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ değerleri, 6 ve 12 saat süreli $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$, $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},12\text{h})$ ve $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$, $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},12\text{h})$ değerleri arasındaki benzerlik/farklılık incelenmiş ve sonuçlar Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11'den de görüldüğü gibi 24 saat süreli hesaplanan RF-EMA'nın ortalama ve standart sağma değerleri, 6 ve 12 saat için hesaplanan değerlere oldukça yakındır. 6 saat süresince hesaplanan $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$ ile 24 süresince hesaplanan $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ arasındaki NHHOK 0,0084'dür. 12 saat için ise bu değer 0,0068'e düşmektedir. $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ için hesaplanan değer ile 6 saat süresince hesaplanan değer ($E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$) arasındaki NHHOK 0,0367, 12 saat süresince hesaplanan değer arasındaki NHHOK değeri ise 0,0297'dir. Dolayısıyla 24 saat yerine 6 saatlik veri göz önünde bulundurulduğunda $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$ %99,16, $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$ ise %96,33 doğrulukla hesaplanabilmektedir. Eş. 8'deki gibi doğrusal regresyon analizi kullanılarak $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ ile

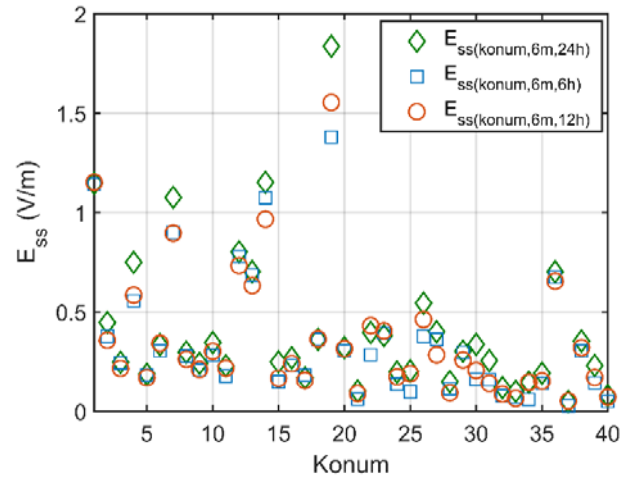
$E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ değerleri $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$ ile $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h})$ değerleri kullanılarak Eş. 15 ve Eş. 16'daki gibi hesaplanabilir.

$$\hat{E}_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h}) = 1,0186 \times E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h}) + 0,0690 \quad (15)$$

$$\hat{E}_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h}) = 1,1135 \times E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},6\text{h}) + 0,0264 \quad (16)$$



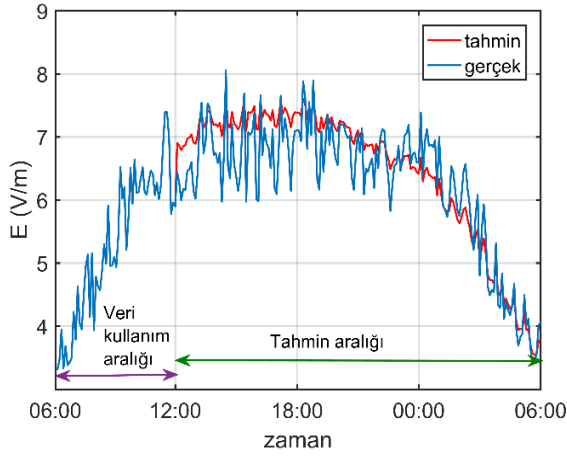
Şekil 10. 40 farklı ortam için 6, 12 ve 24 saat süreli E_{ort} değerleri
(E_{avg} values for 6, 12 and 24 hours for 40 different environments)



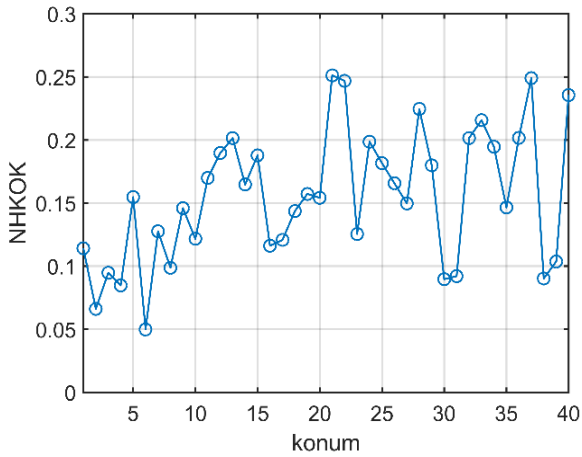
Şekil 11. 40 farklı ortam için 6, 12 ve 24 saat süreli E_{ss} değerleri
(E_{std} values for 6, 12 and 24 hours for 40 different environments)

40 farklı ortam için 24 saatlik RF-EMA verisinin her birinin 6 saatlik değişimi kullanılarak (06:00-12:00 arası) geri kalan 18 saatlik bölümünü (12:00-06:00 arası) tahmin etmek adına; ölçülen RF-EMA verisinin ilk 6 saatlik bölümü kullanılarak Eş. 15 ve Eş. 16 eşitlikleri ve sonrasında Eş. 13 ve Eş. 14'deki gibi $E_{\text{ort}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ ve $E_{\text{ss}}(\text{konum},6\text{m},24\text{h})$ değerleri yeniden hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak her bir ortam için ilk önce Eş. 9, Eş. 10 ve Eş. 11'deki verilen

polinom katsayıları, sonrasında ise bu katsayılar kullanılarak 2. derece polinom ifadesi Eş. 4'deki gibi elde edilmiştir. RF-EMA'nın gün içindeki değişimin gerçek değeri ile tahmin edilen değeri arasındaki fark NHKOK değeri ile karşılaştırılmıştır. K1 için RF-EMA'nın kullanılan ve tahmin edilen veri parçası Şekil 12'de gösterilmiştir. K1 için RF-EMA'nın gerçek değeri ile tahmin edilen değeri arasındaki NHKOK değeri 0,1141'dir. 40 farklı ortam için tahmin edilen RF-EMA değeri ile gerçek değeri arasındaki NHKOK değeri Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13'den de görüldüğü gibi gerçek RF-EMA ile tahmin edilen RF-EMA arasındaki NHKOK değerleri 0,0498 ile 0,2512 arasında değişmektedir. Tahmin edilen RF-EMA arasındaki en düşük NHKOK değeri 0,0498 ile K6'dadır. En yüksek NHKOK ise 0,2512 ile K21 içindir. 40 farklı ortam için ortalama NHKOK değeri ise 0,1551'dir. Şekil 12 bütün olarak düşünüldüğünde önerilen model ile RF-EMA'nın gün içindeki değişimi sadece 6 saatlik veriler kullanılarak %95'e varan doğrulukla modellenilebilir.

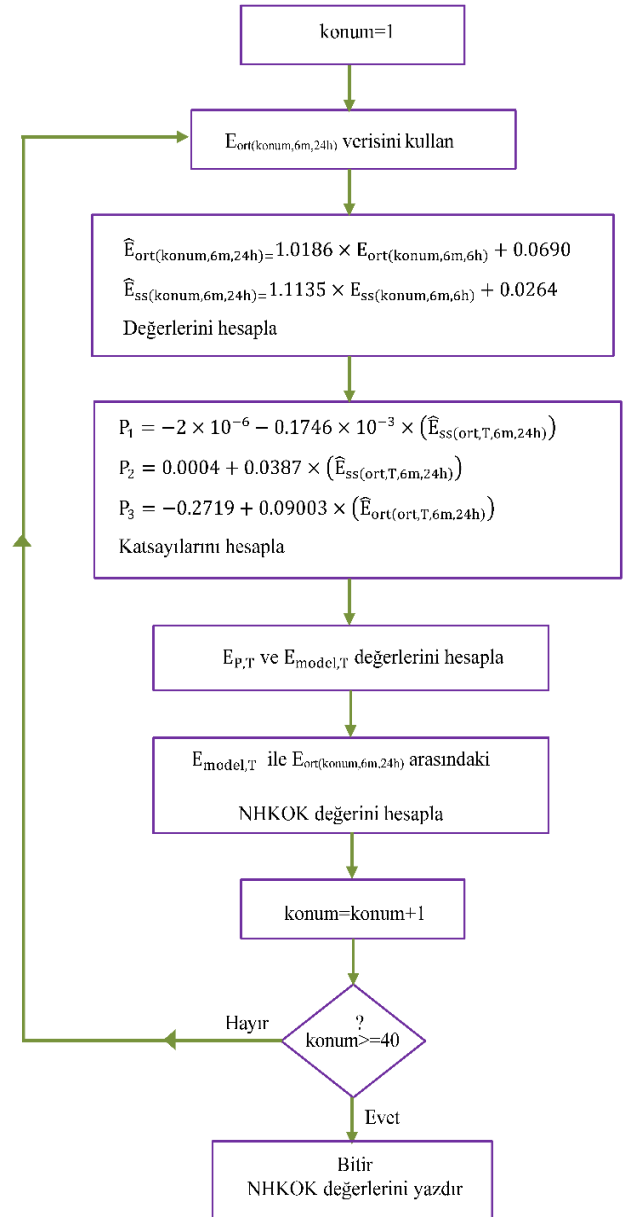


Şekil 12. 24 saatlik verinin RF-EMA verisinin 6 ve 18 saatlik değişim aralıkları (6-hour and 18-hour change intervals of 24-hour RF-EMF)



Şekil 13. Gerçek ve tahmin edilen RF-EMA arasındaki NHKOK değerinin konuma bağlı değişimi (Variation of NRMSE between actual and estimation of RF-EMF depend on location)

Gün içindeki RF-EMA'nın 6 saatlik bölümünü kullanarak geri kalan 18 saatlik bölümünü tahmin edilebileceğimiz çalışmamızı daha açıklayıcı hale getirmek adına oluşturulan akış diyagramı Şekil 14'de verilmiştir. Şekil 14'den de görüldüğü gibi, ölçüm konumuna göre ilk önce RF-EMA'nın 6 saatlik kısmı kullanılarak $E_{ort(konum,6m,6h)}$ ve $E_{ss(konum,6m,6h)}$ değerleri hesaplanır. Sonra bu değerler kullanılarak $\hat{E}_{ort(konum,6m,24h)}$ ve $\hat{E}_{ss(konum,6m,24h)}$ değerleri tahmin edilir ve P_1 , P_2 ve P_3 polinom katsayıları bulunur. 2. derece polinom katsayıları ve β_{model} ifadesi kullanılarak $E_{model,T}$ oluşturulur. $E_{model,T}$ ile gerçek RF-EMA değerleri karşılaştırılarak ilgilene konum için tahmin doğruluğu (NHKOK) elde edilir.



Şekil 14. Gün içindeki RF-EMA'nın değişimini tahmin eden modelin akış diyagramı (Flow chart of the model predicting the change of RF-EMF during the day)

Çalışmanın son kısmında önerilen modelin doğruluğu farklı şehirler için kaydedilen 24 saatlik RF-EMA verileri kullanılarak test edilmiştir. Bunun için literatürdeki üç şehir verisi (Ankara, Malatya, Konya) ile BTK tarafından yayımlanan üç şehir verisi (Ankara, İstanbul, İzmir) kullanılmıştır. Bu altı şehir için kaydedilen RF-EMA verisinin gün içindeki değişimi önerilen yöntem ile modellenmiştir. 24 saatlik RF-EMA verisinin 6 saatlik kısmı polinom katsayılarını bulmak için, 18 saatlik kısmı ise oluşturulan 2. derece polinom ile RF-EMA'yı tahmin etmek için kullanılmıştır. Altı şehir için gerçek RF-EMA ile tahmin edilen RF-EMA arasındaki farkın NHKOK değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de görüldüğü gibi altı farklı ortam için tahmin edilen RF-EMA'nın NHKOK değerleri Şekil 14'de verilen çalışmamızın sınırları (0,0498 ile 0,2512) içinde kaldığı söylenebilir.

Tablo 5. Önerilen modelin farklı şehirler için alınan RF-EMA verileri ile karşılaştırılması
(Comparison of the proposed model with RF-EMA values for different cities)

| Referans Çalışma | Çalışmanın Yapıldığı Şehir | Gerçek ve tahmin edilen RF-EMA arasındaki NHKOK değeri |
|------------------|----------------------------|--|
| [13] | Konya | 0,1425 |
| [14] | Malatya | 0,0890 |
| [28] | Ankara | 0,0941 |
| [35] | İstanbul | 0,1852 |
| [35] | Ankara | 0,1504 |
| [35] | İzmir | 0,1713 |

5. KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

| | |
|-----------------------|--|
| ARPANSA | : The Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency |
| BDF | : Birikimli Dağılım Fonksiyonu |
| BTK | : Bilgi İletişim Teknolojileri Kurumu |
| CC | : Correlation Coefficient |
| CDF | : Cumulative Distribution Function |
| E | : Elektrik alan şiddeti |
| EMA | : Elektromanyetik Alan |
| EMD | : Elektromanyetik Dalgası |
| ICNIRP | : The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| E_p | : Gerçek RF-EMA verisi kullanılarak oluşturulan polinom |
| $E_{p, T}$ | : Tahmin edilerek oluşturulan polinom |
| E_{model} | : Gerçek RF-EMA verisi kullanılarak oluşturulan model |
| $E_{model, T}$ | : Tahmin edilerek oluşturulan model |
| E_{ort} | : Elektrik alan şiddetinin ortalaması |
| E_{ss} | : Elektrik alan şiddetinin standart sapması |
| $E_{ort(6m)}$ | : Elektrik alan şiddetinin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{5s,24h}$ | : 5 saniye aralıklara ve 24 saat süresince kaydedilen elektrik alan şiddeti |
| $E_{mak(K22,5s,24h)}$ | : K22 konumu için 5saniye aralıklarla ve 24 saat süresince kaydedilen E'nin en yüksek değeri |

| | |
|-------------------------|--|
| $E_{ort(K22,5s,24h)}$ | : K22 konumu için 5saniye aralıklarla ve 24 saat süresince kaydedilen E'nin ortalaması |
| $E_{ss(5s,24h)}$ | : K22 konumu için 5saniye aralıklarla ve 24 saat süresince kaydedilen E'nin standart sapması |
| $E_{ort(konum,6m,24h)}$ | : Belirli bir konumda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ort(K22,6m,24h)}$ | : K22 konumu için 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{mak(6m,24h)}$ | : 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının en yüksek değeri |
| $E_{ort(6m,24h)}$ | : 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ss(6m,24h)}$ | : 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının standart sapması |
| $E_{ort(T,6m,24h)}$ | : Tüm konumlarda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ort(konum,6h,24h)}$ | : Belirli bir konumda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ort(T,6m,24h)}$ | : Tüm konumlarda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{mak(ort,T,6m,24h)}$ | : Tüm konumlarda konumda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının en yüksek değeri |
| $E_{ort(ort,T,6m,24h)}$ | : Tüm konumlarda konumda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının ortalaması |
| $E_{ss(ort,T,6m,24h)}$ | : Tüm konumlarda konumda 24 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının standart sapması |
| $E_{ort(konum,6m,6h)}$ | : Belirli bir konumda 6 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ort(konum,6m,12h)}$ | : Belirli bir konumda 12 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalaması |
| $E_{ss(konum,6m,6h)}$ | : Belirli bir konumda 6 saat süresince kaydedilen E'nin 6 saatlik ortalamasının standart sapması |
| $E_{ss(konum,6m,12h)}$ | : Belirli bir konumda 12 saat süresince kaydedilen E'nin 6 dakikalık ortalamasının standart sapması |
| FCC | : Federal Communications Commission |
| ICNIRP | : The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| KK | : Korelasyon Katsayısı |
| NHKOK | : Normalize Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü |
| NRMSE | : Normalized Root Mean Square Error |
| P_1, P_2, P_3 | : Polinom katsayıları |
| Φ | : Zaman indeksi |

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada baz istasyonlarını doğrudan gören 40 farklı ev ortamında 24 saat süresince maruz kalınan RF-EMA seviyeleri kayıt altına alınmıştır. Ölçümlerde en yüksek RF-EMA değeri 17,31 V/m, 24 saatlik RF-EMA ölçümlerin ortalaması ise 14,16 V/m olarak kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde 100kHz-3GHz arasındaki ICNIRP

ve BTK tarafından belirlenen değer limit değerlerin altında olduğu görülmüştür. Ölçülen RF-EMA değerleri her ne kadar ICNIRP ve BTK tarafından belirlenen limit değerlerin altında olsa da daha düşük limit değerleri referans alan ülkeler (İsviçre 5V/m, İtalya 6V/m) için oldukça yüksektir. RF-EMA'nın gün içinde ölçüm zamanına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve öğlen saatlerinde ölçülen RF-EMA değeri gece saatlerine göre yaklaşık %32 daha fazla olduğu görülmüştür. Uzun süreli RF-EMA verileri analiz edildiğinden en iyi Burr dağılım ile ifade edilebilir olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında gün içindeki RF-EMA'nın değişimi 2. dereceden polinom ile modellenmiştir. Sonrasında ise doğrusal regresyon analizi ile polinom katsayıları ile E_{ort} ve E_{ss} değerleri arasındaki ilişki belirlenmiş, RF-EMA'nın gün içindeki değişimini veren bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model ile RF-EMA'nın gün içindeki 6 saatlik ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak 24 saat süresince RF-EMA'nın değişimi RF-EMA ölçümüne gerek olmadan %95'e varan doğrulukla tahmin edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ICNIRP, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz), *Health Phys.*, 74 (4), 494-522, 1998.
2. WHO, Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz), *Environmental Health Criteria* 137, Geneva, Switzerland, 1993.
3. IEEE, IEEE C95.1-2005 Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, New York, USA, 2005.
4. FCC, Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields. 1997.
5. ARPANSA, Radiation Protection Standard for Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields 3 kHz to 300 GHz, *Radiation Protection Series Publication no. 3*. 2002.
6. Health Canada, Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Energy in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz, *Safety Code* 6. 2015.
7. BTK, Elektronik Haberleşme Cihazlarından Kaynaklanan Elektromanyetik Alan Şiddetinin Uluslararası Standartlara Göre Maruziyet Limit Değerlerinin Belirlenmesi, Kontrolü ve Denetimi Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 17 Nisan 2018, *Resmi Gazete*, Sayı:30394.
8. Engiz B.K., Kurnaz C., Monitoring and Assessment of Electric Field Strength due to Base Stations in the Home Environment, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 18 (3), 913-920, 2018.
9. Engiz B.K., Kurnaz C., Long-Term Electromagnetic Field Measurement and Assessment for a Shopping Mall, *Radiat. Prot. Dosim.*, 175 (3), 321-329, 2017.
10. Kurnaz C., An Empirical Modeling of Electromagnetic Pollution on a University Campus, *ACES Journal*, 33 (1), 111-114, 2018.
11. Kurnaz C., Engiz B.K., Bozkurt M.C., Measurement and Evaluation of Electric Field Strength Levels in Primary and Secondary Schools in a Pilot Region, *Radiat. Prot. Dosim.*, 179 (3), 282-290, 2018.
12. Engiz B.K., Kurnaz C., Determination of Electric Field Strength Level in a Medium using Time Series Analysis, *International Journal of Engineering Research and Development*, 10(2), 29-35, 2018.
13. Seyfi L., Measurement of electromagnetic radiation with respect to the hours and days of a week at 100 kHz–3GHz frequency band in a Turkish dwelling, *Measurement*, 46 (9), 3002-3009, 2013.
14. Karadağ T., Yüceer M., Abbasov T., Large-Scale Measurement, Analysis and Modelling of Electromagnetic Radiation Levels in the Vicinity of GSM/UMTS Base Stations in an Urban Area, *Radiat. Prot. Dosim.*, 168 (1), 134-147, 2015.
15. Koprivica M., Slavkovic V., Neskovic N., Neskovic A., Statistical Analysis of Electromagnetic Radiation Measurements in the Vicinity of GSM/UMTS Base Station Installed on Buildings in Serbia, *Radiat. Prot. Dosim.*, 168 (4), 489-502, 2016.
16. Bornkessel C., Schubert M., Wuschek M., Schmidt P., Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations, *Radiat. Prot. Dosim.*, 124 (1), 40–47, 2007.
17. Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J., Grellier J., Samaras T., Thuroczy G., Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz), *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 25 (1), 37-44, 2015.
18. Joseph W., Frei P., Roösli M., Thuroczy G., Gajsek P., Treck T., Bolte J., Vermeeren G., Mohler E., Juhasz P., Finta V., Martens L., Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe, *Environ. Res.*, 110 (7), 658-663, 2010.
19. Wout J., Verloock L., Goeminne F., Vermeeren G., Martens L., Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments, *Health Phys.*, 102 (2), 161-172, 2012.
20. Rowley J., Joyner K., Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 22 (3), 304-315, 2012.
21. Sagar S., Struchen B., Finta V., Eeftens M., Röösli M., Use of portable exposimeters to monitor radio frequency electromagnetic field exposure in the everyday environment, *Environ. Res.*, 150, 289-298, 2016.
22. Sanjay S., Stefan D., Anna S., Katharina R., Marloes E., Benjamin S., Milena F., Noemi M., Seid A., Martin R., Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 28 (2), 147-160, 2018.

23. Urbinello D., Joseph W., Huss A., Verloock L., Beekhuizen J., Vermeulend R., Martens L., Rösli M., Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels indifferent European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits, *Environ. Int.*, 68, 49-54, 2014.
24. Urbinello D., Joseph W., Verloock L., Martens L., Rösli M., Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities, *Environ. Res.*, 134, 134-142, 2014.
25. Urbinello D., Huss A., Beekhuizen J., Vermeulen R., Rösli M., Use of portable exposure meters for comparing mobile phone base station radiation in different types of areas in the cities of Basel and Amsterdam, *Sci Total Environ.*, 468-469,1028-1033, 2014.
26. Verloock L., Joseph W., Goeminne F., Martens L., Verlaek M., Constandt K., Assessment of radio frequency exposures in schools, homes, and public places in Belgium, *Health Phys.*, 107 (6), 503-513, 2014.
27. Sam A., Joe W., Luc M., Wout J., Assessment of Long-Term Spatio -Temporal Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure, *Environ Res.*, 161, 136-143, 2018.
28. Özdemir A.R., Alkan M., Gülşen M., Time dependence of environmental electric field measurements and analysis of cellular base stations, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3 (3), 43-48, 2014.
29. Çerezci O., Kanberoğlu B., Yener Ş.Ç., Analysis on trending electromagnetic exposure levels at homes and proximity next to base stations along three years in a city, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 23 (1), 71-81, 2015.
30. Aerts S., Deschrijver D., Verloock L., Dhaene T., Martens L., Joseph W., Assessment of outdoor radiofrequency electromagnetic field exposure through hotspot localization using kriging-based sequential sampling, *Environ. Res.*, 126, 184-191, 2013.
31. Beekhuizen J., Vermeulen R., Kromhout H., Bürgi A., Huss A., Geospatial modelling of electromagnetic fields from mobile phone base stations, *Science of the Total Environment*, 445-446, 202-209, 2013.
32. Kunter F., Students Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields in Marmara University, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 32-36, 2015.
33. PMM-8053. <https://www.narda-sts.com/en/selective-emf/srm-3006-field-strength-analyzer/>. Erişim tarihi Aralık 21, 2020.
34. SRM-3006. [www. Narda – sts .us /pdf _files/ DataSheets /SRM3006_DataSheet.pdf](http://www.narda-sts.us/pdf_files/DataSheets/SRM3006_DataSheet.pdf). Erişim tarihi Aralık 21, 2020.
35. BTK. Elektromanyetik Alanları Sürekli İzleme Sistemi. <http://ema-olcum.btk.gov.tr/>. Erişim tarihi Aralık 21, 2020.

