

GSM, UMTS ve LTE Baz İstasyonu Sinyallerinin Oluşturduğu Maruziyetin Frekans Seçici Ölçümleri ve Analizi

Frequency Selective Measurements and Analysis of Exposure to GSM / UMTS / LTE Base Station Signals

Mustafa Çetintas¹, Cafer Bahadır Tektaş²,

^{1,2}TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye
mustafa.cetintas@tubitak.gov.tr, bahadir.tektas@tubitak.gov.tr

Öz

Günümüzde, elektromanyetik alanların sebep olduğu maruziyetin seviyesini ölçmek için yaygın olarak frekans seçici ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Ancak bu ölçümler uzmanlık gerektiren ve uygulamada farklı sonuçlar verebilen hassas ölçümlerdir. Bu nedenle, farklı GSM (Global System for Mobile Communication), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ve LTE (Long Term Evolution) baz istasyonu antenlerinden gelen sinyallerin RF maruziyetinin hassas bir şekilde ve frekans seçici olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, frekans seçici ölçüm yöntemi kullanılarak Almanya/Regensburg'da bulunan elektromanyetik kirlilik ölçümleri konusunda uzman, referans bir laboratuvar ile TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), Elektromanyetik Laboratuvarı arasında karşılaştırma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ölçümler, Almanya/Bayreuth'da 4 farklı bölgede bulunan baz istasyonlarında, her bölgede 2 ölçüm noktası seçilerek eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Dört farklı konumda bulunan, 8 farklı ölçüm noktasındaki bağıl farkın 0 dB ile 1.4 dB arasında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen karşılaştırma sonucu verileri incelendiğinde her iki ölçüm ekibi tarafından oluşturulan ölçüm sonuçlarının iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik, Maruziyet, Frekans Seçici, Karşılaştırma, Ölçüm

Abstract

Nowadays, the frequency selective measurement method is commonly used to measure the level of exposure caused by electromagnetic fields. However, these measurements are sensitive measurements that require expertise and can give different results in practice. For this reason, the RF exposure of the signals from different GSM (Global System for Mobile Communication), UMTS (Universal Mobile

Telecommunications System) and LTE (Long Term Evolution) base station antennas needs to be measured sensitively as frequency selective and evaluated accurately. For this purpose, the comparison measurements were performed between the Electromagnetic Laboratory of TUBITAK National Metrology Institute (UME) and the reference laboratory, which are experts in electromagnetic pollution measurements situated in Germany/Regensburg by using frequency selective measurement method. Within the scope of study, the measurements were performed and evaluated simultaneously at 4 different locations of base stations in Bayreuth, Germany by selecting 2 measurement points in at each location. The relative difference in 8 different measuring points at the 4 different locations was determined to be between 0 dB and 1.4 dB. When the comparison result data were investigated, it was seen that the measurement results generated by both measurement teams were in good agreement.

Keywords: Electromagnetic, Exposure, Frequency Selective, Comparison, Measurement

1. Giriş

Elektromanyetik alanların sebep olduğu maruziyetin belirlenmesi için gerçekleştirilen elektromanyetik kirlilik ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan iki ölçüm yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki, geniş bant alan problemlerinin kullanımını gerektiren, basit ve hızlı ölçüm çözümler sunan geniş bant ölçüm yöntemidir. Geniş bant ölçümlerinde kullanılan alan problemleri çok geniş frekans aralığında, sahip oldukları izotropik yapı gereği prob içerisinde bulunan x, y ve z eksenlerinden her birinin ölçtüğü elektrik veya manyetik alan değerini, toplayarak tek bir değer olarak vermektedir. Ancak geniş bant alan problemleri, radyo, TV yayını veya baz istasyonları gibi farklı frekans aralıklarındaki radyasyonları sınıflandırmak üzere tasarlanmamıştır. Bu durum ölçülen elektromanyetik alan seviyesini maruziyet limitleriyle karşılaştırılması durumunda

sorunlara neden olmaktadır [1]. Ayrıca baz istasyonları gibi modülasyonlu ve sinyal gücünün hızlı değiştiği sinyaller ölçülürken okuma hataları ortaya çıkabilmektedir. Geniş bant ölçüm yönteminin sahip olduğu bu dezavantajları nedeniyle elektromanyetik kirlilik ölçümlerinde kullanılması sakıncalı olabilmektedir. Bu noktada karşımıza diğer bir ölçüm yöntemi olan ve çalışmanın temelini oluşturan frekans seçici ölçümler çıkmaktadır [2,3].

İkinci yöntem olan frekans seçici ölçümlerde, güvenlik analizi ve yüksek frekanslı elektromanyetik alanların çevresel ölçümleri için kompakt frekans seçici ölçüm cihazları kullanılmaktadır. Bu yöntem ile geniş bir frekans bandı içerisindeki istenilen bir frekans aralığı bölgesi ölçülebilir [4]. Cihazın sahip olduğu frekans bilgisi sayesinde ölçülen her sinyale ait ölçüm sonucu görüntülenmekte ve böylece frekansa karşılık gelen limitler de kolaylıkla uygulanabilmektedir. Frekans seçici ölçüm cihazları kullanılarak yapılacak frekans seçici ölçümler ile birçok mobil telefon servis sağlayıcısının ortak anten gruplarını kullandıkları mekânlar olarak adlandırılan baz istasyonları ve ihtiva ettikleri alanların bilinmediği benzeri ortamlarda, hem toplam alan seviyesi hem de her bir tekil servis sağlayıcısının toplam alan içindeki payı gerek mutlak değer gerekse izin verilen seviyenin yüzdesi olarak gösterilebilir. Bu sayede her servis kendi kanallarına çözümlenir ve her kanalın toplam alan yayımı içerisindeki payı ölçülebilir. Frekans seçici ölçümlerde kullanılan cihazlar genel olarak bir spektrum analizörün evrensel olarak kullanılan genel özelliklerini taşırlar. Birden fazla ölçüm modları bulunmakta ve sahip oldukları bu modlar ile baz istasyonlarından yayılan GSM, UMTS ve LTE sinyallerini çok hassas bir şekilde ölçebilir ve yüksek kesinlikle hesaplayabilirler [5].

Bu çalışmada frekans seçici ölçüm cihazı ve cihazın içerisinde bulunan spektral ölçüm modu ve kod çözücü ölçüm modu kullanılarak, referans bir laboratuvar ile karşılaştırma ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, Almanya/Bayreuth'da 4 farklı baz istasyonunda eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Her lokasyonda 2 ölçüm noktası seçilmiş ve tüm ölçüm noktaları baz istasyonu antenlerine doğrudan bakan dış mekan noktaları olarak belirlenmiştir. Ölçümü gerçekleştirilen her noktaya ait ölçüm sonucu için paralel değerlendirmeler ve hesaplamalar yapılmıştır. Son olarak her iki laboratuvar tarafından elde edilen ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

2. Baz İstasyonları

RF radyo vericileri etrafında ölçülen maruziyet değerleri genellikle elektrik alan şiddeti E (V/m), manyetik alan şiddeti H (A/m) veya güç akı yoğunluğu S (W/m²) olarak verilir. Bir vericinin uzak alanında, elektrik ve manyetik alan şiddeti ve güç yoğunluğu sabit bir oranla birleştirilir. Cep telefonu baz istasyonları etrafındaki ölçümler, genellikle baz istasyonundan yeterince uzakta gerçekleştirildiği için uzak alan koşulları kabul edilebilir [6]. Bu nedenle maruz kalma değerlendirmesi yapılırken denklik (1)'de belirtildiği gibi bu üç büyüklükten elektrik alanın ölçülmesi yeterlidir. Özel olarak belirtilmediği sürece, maruz kalma seviyelerinin her zaman RMS değeri olarak verildiği ve maruz kalma sınırlarının frekansa bağlı olduğu belirtilmelidir. Çoklu sinyal ve çoklu frekanslı ortamlarda, her bir sinyal, karşılık

gelen maruz kalma sınırının bir oranı olarak toplanmalıdır. Tüm sinyaller için birleşik oranlar denklik (2)'de verildiği gibi "1" değerini aşmamalıdır [7,8]. Bu nedenle, maruziyet seviyesinin belirlenebilmesi için, frekans seçici ölçüm cihazları, uygun bir ölçüm yapmak için bir zorunluluktur.

$$S\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{E^2(V/m)}{377(\Omega)}$$

(1)

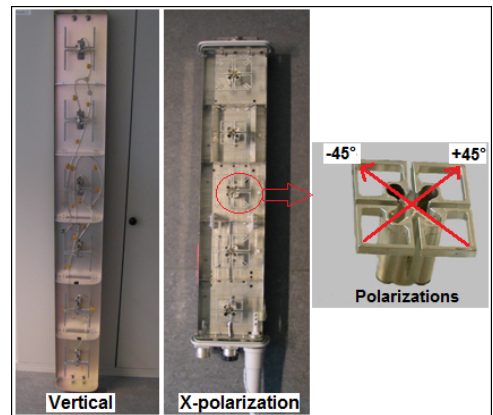
$$\sum \frac{S_{ölçülen}(f_1)}{S_{lim}(f_1)} + \sum \frac{S_{ölçülen}(f_2)}{S_{lim}(f_2)} + \sum \frac{S_{ölçülen}(f_3)}{S_{lim}(f_3)} + \dots \leq 1$$

(2)

Frekans seçici yöntem ile ölçümü gerçekleştirilen baz istasyonlarının yapısına baktığımızda, Şekil 1'de görüldüğü gibi genel olarak her biri 120°'lik açığa sahip üç antenle, 360° derecelik bir alanı kapsayan sektör antenlerden oluşmaktadır. Her bir baz istasyonunda genellikle 3 sektör anten bulunurken, her bir sektör antende ise Şekil 2'deki gibi aralarında 180° olan 2 anten veya aralarında 90° olan 4 anten bulunmaktadır [9,10].



Şekil 1. Baz istasyonu sektör antenleri



Şekil 2. Baz istasyonu sektör antenlerinin iç yapısı [11]

Baz istasyonları, sahip olduğu anten yapısının yanı sıra, hizmet ettiği bölge ve konuma göre farklı trafik kapasitelerine, farklı sinyal güçlerine ve farklı güç üretimlerine sahiptirler. Bu durum her baz istasyonunun farklı bir elektromanyetik maruziyet seviyesine sahip olmasına neden olur [12]. Ancak elektromanyetik maruziyet ölçümünde en önemli olan nokta baz istasyonunun hangi hücrel haberleşme sistemlerini bünyesinde bulundurduğunun frekans seçici olarak tespit edilebilmesidir.

Günümüzde, hücrel mobil baz istasyonları GSM (2G), UMTS (3G) ve LTE (4G) haberleşme teknolojilerini içermektedir. Baz istasyonları sahip oldukları sektör antenler ile bu üç teknolojiyi ayrı ayrı veya aynı anda servis edebilir [13]. Ancak, GSM, UMTS ve LTE sinyalleri aynı anda tek bir baz istasyonu üzerinden yayın gerçekleştirse de, sahip oldukları farklı frekans aralıkları, modülasyon tipleri, kanal ve sinyal bant genişlikleri gibi özelliklerinden dolayı elektromanyetik maruziyet ölçümleri sırasında her birinin ayrı ayrı ölçülmesi gerekmektedir. Bu noktada yapılması gereken frekans seçici olarak ölçümleri gerçekleştirebilen ölçüm cihazlarını, ölçümü yapılacak sinyale uygun ayarlarını yaparak kullanmaktır. Frekans seçici ölçümler sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise ölçüm tekniğidir. Farklı ölçüm teknikleri olmasına rağmen en çok kullanılan teknik, tarama yöntemi (sweeping method) dir. Bu teknikle frekans seçici ölçüm cihazı manuel olarak yönlendirilir ve hacim taraması yapılarak ölçümler gerçekleştirilir. Tarama sırasında, izotropik anten farklı polarizasyonlarda ölçüm alacak şekilde gezdirilir. Ölçümlerde, en az bir insan boyu kadar yükseklikte belirli bir alan maksimum seviyeyi bulmak için taranır. Ölçümün gerçekleştirileceği noktanın yansıtıcı yüzeylerden en az 50 cm uzakta olması gerekmektedir [14].

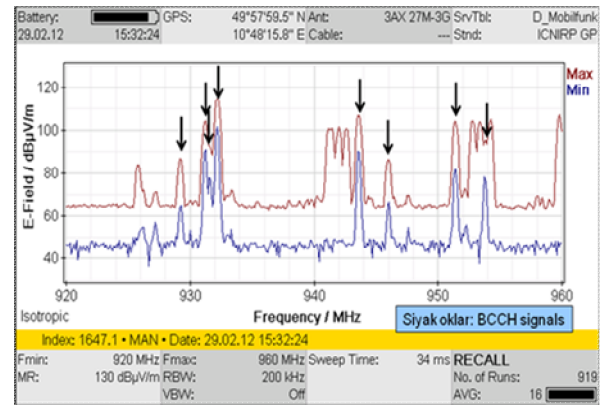
2.1. GSM Baz İstasyonları

GSM (Global System for Mobile Communication) baz istasyonları ses ve veri sinyallerini iletmek için çeşitli teknikleri bir araya getiren tipik olarak 3 sektör antenden oluşmaktadır. GSM, 200 kHz sinyal bant genişliğine sahip birkaç frekans kanalı (taşıyıcı) kullanır. Bu frekans kanallarının her biri sekiz zaman aralığı (veya zaman kanalı) içerir. Her zaman dilimi (darbe genişliği = 577µs, darbe periyodu = 4600µs) sadece bir ses kanalı taşır, bu nedenle teorik olarak en fazla 8 telefon bir verici frekansı ile servis edilebilir (TDMA = zaman bölmeli çoklu erişim). Her bir GSM baz istasyonu, ağ ve baz istasyonunun kendisi hakkında bilgiler içeren bir baz kanalı sağlar [15]. Bu kanal belirli bir frekans bandını kaplar ve Broadcast Control Channel (BCCH) olarak adlandırılır. Pratik olarak sabit alan şiddetinde iletilir. Ses ve veri sinyallerini iletmek için buna trafik kanalları (TCH) adı verilen bir veya daha fazla frekans kanalı eklenir. Bu kanalların alan şiddeti yüke göre değişir ve tamamen kapatılabilirler [16,17]. Mevcut bir bağlantının kesintisiz olarak farklı frekans kanallarına geçirildiği durumlarda frekans atlama da mümkündür. Frekans seçici ölçüm cihazları kullanılarak gerçekleştirilecek GSM baz istasyonu ölçümlerinde downlink frekans bandındaki BCCH frekans kanalları biliniyorsa ölçüm cihazının spektrum analiz

modunda ölçümleri kolaylıkla yapılabilir. Eğer frekans bilgisi bulunmuyor ise, BCCH kanalı frekanslarının alan güçleri TCH kanallarına kıyasla çok daha dengeli olması nedeniyle spektrumda kolayca tanınabilirler [18]. Bunun için frekans seçici ölçüm cihazı ile spektral modda maksimum ve minimum işaret seviyelerine bakılarak Şekil 3'deki gibi spektrumda gücü sabit kalan frekanslar BCCH kanalı olarak tespit edilir. BCCH kanalı frekansları belirlendikten sonra, spektrumu tek tek kanallara ayırtırmak için yeterli çözünürlük bant genişliği, video bant genişliği, detektör tipi vb. ayarlamalar ölçüm cihazı üzerinden ayarlanır ve her bir sektör anten için, hücrenin izin verilen maksimum güç düzeyinde (Pmax) çalıştırılmadığı durumda, denklik (3) kullanılarak E_{BCCH} elektrik alan şiddeti hesaplanır.

$$E_{BCCH_maks,ant} = E_{BCCH,ant} \cdot \sqrt{\frac{P_{maks,ant}}{P_{BCCH,ant}}}$$

(3)



Şekil 3. BCCH kanalı frekanslarının tespiti

İzin verilen maksimum çıkış gücü P_{max} seviyesinin gerçek P_{BCCH} güç seviyesine oranını belirlemek için servis sağlayıcısı tarafından verilen bilgiye ihtiyaç vardır. Tüm trafik kontrol kanalları (TCH) tam olarak yüklenmişse ortaya çıkacak olan hücrenin toplam alan şiddeti E_{max}, denklik (4)'teki gibi BCCH'in alan gücünün ekstrapolasyonu ile elde edilir.

$$E_{maks} = E_{BCCH_maks} \cdot \sqrt{n}$$

(4)

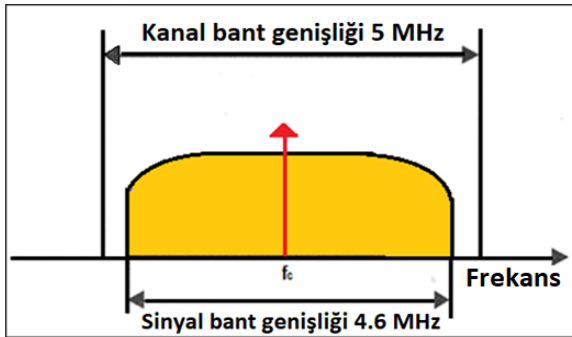
Burada n, BCCH dahil olmak üzere toplam trafik kanalı sayısıdır. Ancak mümkünse ölçümlerden önce muhtemel trafik kanalı sayısı servis sağlayıcısı tarafından alınmalıdır. Tipik olarak, bir sağlayıcıdan üç BCCH ve belirli bir alan için ölçülecek diğer sağlayıcılardan gelen olası BCCH kanalları olacaktır. Bu durumda GSM bandı için toplam alan maruziyeti seviyesi denklik (5)'teki gibi olmalıdır.

$$TEQ_E = \sqrt{\left(\frac{E_{maks,1}}{E_{G1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{maks,2}}{E_{G2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{E_{maks,n}}{E_{Gn}}\right)^2} \cdot 100\% \quad (5)$$

Burada n, BCCH kanallarının sayısıdır. Formüle bakıldığında, $E_{max,n}$, her bir frekans kanalı için ekstrapolasyonlu alan şiddetini, E_{Gn} , frekansa uygulanacak limit değeri, TEQ_E ise toplam maruz kalma oranını göstermektedir [19].

2.2. UMTS Baz İstasyonları

UMTS (3G) (Universal Mobile Telecommunications System), üçüncü nesil cep telefonu standardıdır. UMTS ile GSM (2G) karşılaştırıldığında, değişken ve çok daha yüksek veri aktarım hızına sahip olduğu görülür. Daha yüksek bir veri hızı daha kısa bir spektrum aralığı ile birleştiğinden, daha yüksek bir verici istasyon yoğunluğu gereklidir. UMTS ve GSM gibi kablosuz servisler genellikle aynı anten konumunu paylaştıkları için UMTS'ye bağlı toplam saha maruziyet seviyesinin oranı sadece frekans seçici ölçümle belirlenebilir [6,20]. UMTS, ses ve veri sinyallerini iletmek için geniş bant kod bölmeli çoklu erişim prosedürünü (W-CDMA) kullanır. Her bir ses ve veri kanalı farklı kodlarla aynı frekans bandında iletilir. Her sağlayıcı, Şekil 4'teki gibi her biri 5 MHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla frekans kanalı kullanabilir. Her UMTS baz istasyonu bu frekans kanallarından birinde çalışır. Böylece, birçok hücre aynı frekansı kullanabilmektedir. UMTS sinyallerinin iki farklı modu bulunmaktadır. Bunlar, uplink ve downlink için ortak tek bir frekans kanalının kullanıldığı FDD modu ve ayrı kanalların kullanıldığı TDD modudur. TDD nadiren kullanılmaktadır, genellikle FDD modu kullanılır [21].



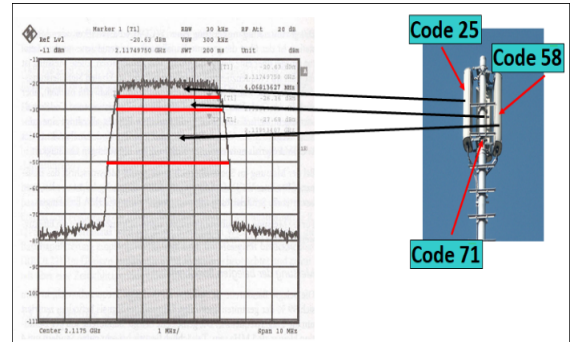
Şekil 4. UMTS sinyaline ait örnek bir spektrum

UMTS kanallarının frekans seçici spektral ölçümüne bakıldığında her bir kanala ait spektrumun merkez frekansı (f_c) belirlenip anlık olarak ölçüldüğünde doğru sonucu verecektir. Ancak buradaki sonuç bazı koşullar altında doğru

olarak kabul edilebilir. Bir spektrum ölçümü ile yalnızca her bir frekans kanalının toplam alan gücü tespit edilebilirken, her antenin bireysel katkısını ayırma imkânı yoktur. Örneğin baz istasyonu antenlerinden herhangi biri yayın yapmadığı takdirde bu durum spektral ölçüm ile fark edilemeyebilir. Ölçümü yapılacak UMTS spektrumunda komşu kanallar var ise spektrum analiz modunda bireysel kanalların ayrılması zorlaşır veya imkânsız hale gelir. Bu nedenle spektral ölçüm ile UMTS kanallarının ölçümü ancak "trafik yükü yok" varsayımı altında gerçekleştirilebilir [22]. Operatör tarafından verilmesi gereken ekstrapolasyon faktörünün (K) bilindiği ve trafik yükünün olmadığı varsayıldığı durumda ölçülen sinyal, P_{min} olarak kabul edilirse, spektrumun maksimum gücü P_{max} denklik (6)' da ki gibi bulunur.

$$P_{maks} = K \cdot P_{min} \quad (6)$$

Denklik (6), "trafik yükü yok" varsayımını kullandığı için maksimum trafiğin kaba bir tahminini vermekte olup, özellikle trafik varken, gerçek maruziyetin daha fazla tahmin edilmesine sebep olabilmektedir. UMTS maruziyetinin belirlenmesinde spektral ölçümünün bu dezavantajlarından kaçınmak için çok daha hassas bir metot olan kod çözücü ölçüm metodu kullanılmaktadır. UMTS baz istasyonlarında ayrı ses ve veri kanallarındaki bilgiler, bir kanalizasyon kodu tarafından ayrı ayrı kodlanır ve Şekil 5'teki gibi aynı anda 5 MHz'lik bir tam sinyal bant genişliği üzerinden yayılır. Bir hücrenin downlink'teki tüm bilgi akışı tekrar bir karıştırma kodu (Scrambling code) kullanılarak karıştırılır. Anten başına bir P-CPICH kanalı (Birincil Ortak Pilot Kanalı), multipleks sinyale gömülür. Bu kanal sabit bir güç seviyesinde ve sürekli olarak iletilir. Bu kanalın alan şiddeti kod çözme yoluyla ölçülebilir ve karıştırma kodu vasıtasıyla belirli bir hücreye atanabilir. Bu değer, "en kötü durum" senaryosunu, yani hücre kapasitesi tamamen kullanıldığında maksimum alan şiddetini tahmin etmek için kullanılabilir.



Şekil 5. Aynı frekans kanalı içerisinde kodlanmış UMTS sinyalleri [11]

Kod çözücü metoda göre, UMTS baz istasyonuna ait her bir sektör antene ait CPICH sinyallerinin alan şiddeti, E_{CPICH} ölçülür ve maksimum kanal gücüne göre ekstrapolasyonu (P_{max}/P_{CPICH} oranı şebeke operatörü tarafından verilmelidir) yapılır. Maksimum elektrik alan denklik (7)'deki gibi belirlenir. Burada n her bir sektör antenin numarasıdır [23].

$$E_{maks,n} = E_{CPICH,n} \cdot \sqrt{\frac{P_{maks,n}}{P_{CPICH,n}}}$$

(7)

Son olarak tüm antenlerin toplam maruziyet seviyesi denklik (8)'deki gibi hesaplanır.

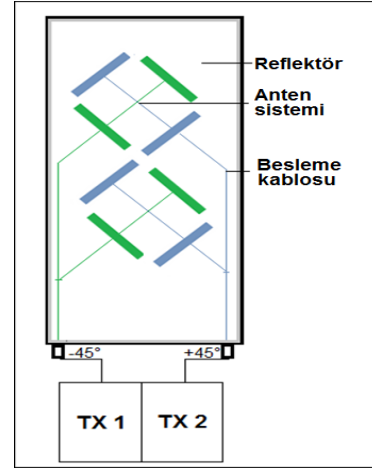
$$TEQ_E = \sqrt{\left(\frac{E_{maks,1}}{E_{G1}}\right)^2 + \left(\frac{E_{maks,2}}{E_{G2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{E_{maks,n}}{E_{Gn}}\right)^2} \cdot 100\%$$

(8)

Bu formülde $E_{maks,n}$, n kodlu sinyal için ekstrapolasyonlu alan şiddetini, E_{Gn} , frekansa uygulanacak ICNRP limit değerlerini, TEQ_E ise toplam maruz kalma oranını göstermektedir. UMTS baz istasyonu ölçümlerinde genellikle tarama ölçüm yöntemi (sweeping method) kullanılır. Kod çözücü ölçümler göreceli uzun bir işlem süresi gerektirdiği için tarama sırasında ölçüm cihazı yavaşça hareket ettirilmelidir [23].

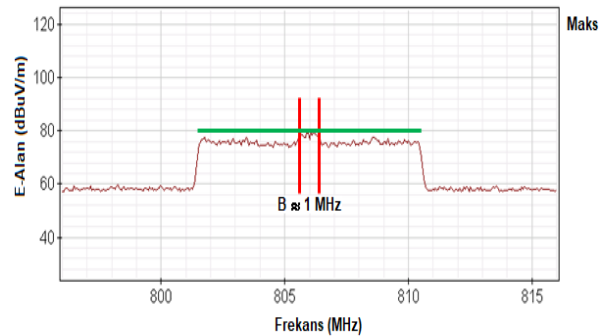
2.3. LTE Baz İstasyonları

LTE (Long Term Evolution), öncüleri GSM ve UMTS ile karşılaştırıldığında, daha yüksek veri hızları, frekans spektrumunun daha verimli kullanılması ve düşük gecikme süreleri ile karakterize edilmiş bir teknolojidir. LTE baz istasyonlarına baktığımızda yayın yapan her sektör 2 veya 4 antenden oluşmaktadır. Her sektörde farklı kanal bant genişliğine (1.4/3/5/10/15/20 MHz) ve farklı sinyal bant genişliğine (1.08/2.7/4.5/9/13.5/18 MHz) sahip sinyaller bulunabilir. Bu sinyaller OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) modülasyonlu sinyallerdir [24]. LTE teknolojisi de UMTS de olduğu gibi FDD ve TDD olmak üzere iki moda çalıştırılmaktadır. Ancak şebekeler genellikle FDD modunda çalıştırılır. Bir LTE baz istasyonunun tipik iletim gücü, kanal başına yaklaşık 20 W ila 50 W arasındadır. Bu seviye GSM ve UMTS istasyonlarının kanal çıkış gücü ile karşılaştırılabilir olmasını sağlar. LTE baz istasyonlarında sinyaller MIMO (Multiple Input - Multiple Output) üzerinden sağlanır. Şekil 6'da verilen MIMO yapısı aslında bir veri üretimini artırma tekniğidir. İki ayrı fiziksel sinyal, iki ayrı anten üzerinden, X polarizasyonunda $\pm 45^\circ$ ile aynı anda yayılır. Gelecekte 4 kanallı MIMO antenlerinin kullanılabilmesi için günümüzde çalışmalar devam etmektedir [6,25].



Şekil 6. İki kanallı MIMO yapısı [11]

Bir LTE sinyalinin en küçük zaman birimi "sembol"dür ve 70 μ s dir. Ardışık olarak bir araya gelen 7 sembol 1 "slot" oluşturur ve 0.5 ms bir zaman dilimi kapsar. Ardışık olarak bir araya gelen 20 slot ise "frame" oluşturur ve 10 ms'dir. Frekans alanında, LTE sinyali için kullanılan modülasyon yöntemi OFDMA (ortogonal frekans bölümü çoklu erişim) nedeniyle 15 kHz'lik bir taşıyıcı boşluğa sahip birçok alt taşıyıcı içerir. En küçük zaman frekansı ünitesine, yani bir semboldeki (15 kHz x 70 μ s) bir alt taşıyıcıya bir kaynak elemanı (RE) denir. Ardışık 12 alt taşıyıcı ve 7 sembol ise Resource Block (RB) oluşturur [26]. Günümüzde LTE baz istasyonlarında maruz kalma ölçümleri, UMTS'de olduğu gibi frekans seçici ölçüm cihazları kullanılarak spektral yöntem ve kod çözücü yöntem ile gerçekleştirilir. Spektral yöntemde, Şekil 7'deki gibi LTE spektrumunda merkez frekansın etrafındaki 1 MHz sinyalleşme bölümüne odaklanılır. Frekans seçici ölçüm cihazı standart bir spektrum analizörü gibi kullanılarak, 1 MHz'lik bir çözünürlük bant genişliği (RBW) ile sinyal bölümü spektrumdan filtrelenebilir ve istasyonun maksimum yüküne ekstrapolasyonu için kullanılabilir. Baz istasyonu sinyalinin yüksek tepe faktörü nedeniyle spektral ölçümde RMS detektörün kullanılması zorunludur. RMS detektörü ile beraber tarama süresinin de (sweep time) ayarlanması gerekmektedir.



Şekil 7. LTE sinyaline ait örnek bir spektrumu

Tarama süresi ne RMS hesaplaması için yeterli örnekleme yapılamayacak kadar kısa ne de aktif semboller arasında oluşacak boşluklardaki ortalamalardan dolayı düşük tahmine sebep olacak kadar uzun olmamalıdır. Maksimum trafik yüküne ekstrapolasyon, baz istasyonun maksimum iletim gücünün, ölçülen sinyalin iletim gücüne oranı kullanılarak gerçekleştirilir. LTE sinyalinin toplam bant genişliğine oranı bize ekstrapolasyon faktörünü (K) verecektir. Buradan maksimum elektrik alan (E_{maks}) denklik (9)'daki gibi elde edilir. Yapılan hesaplama sırasında spektral ölçümlerde kullanılan RMS detektör için ayarlanacak tarama süresi ise denklik (10)'daki gibi belirlenir.

$$E_{maks}[dB\mu V/m] = E_{ölçülen}[dB\mu V/m] + K[dB] \quad (9)$$

$$\text{Tarama süresi} = n \cdot 70 \mu s \quad (10)$$

Burada n yatay tarama noktalarının sayısıdır.

Ancak UMTS' de olduğu gibi LTE sinyallerinin spektral ölçümünde de bazı sakıncalar bulunmaktadır. LTE, tek frekanslı bir ağdır, bu nedenle farklı hücrelerin sinyalleri, spektral ölçümlerle (hem frekans hem de zaman alanında) ayırlamaz. Baz istasyonunun üç sektör anteninden birinin veya bazı MIMO kanallarının ölçüm sırasında yayın yapmadığını fark etmek imkânsızdır. Sektör antenlerden hepsi yayın yapsa bile sahip olabilecekleri farklı ekstrapolasyon faktörleri nedeniyle tam hassasiyetle ölçümler yapılamaz. Spektral ölçüm yönteminden kaynaklanan bu durumların önüne geçebilmek için kullanılacak olan en iyi alternatif yöntem yine kod çözücü ölçüm yöntemidir. Her LTE baz istasyonu için (hücre), hücreye özel olarak kodlanmış bazı sinyaller vardır. Bu sinyaller, P-SS (Primary Synchronization Signal), S-SS (Secondary Synchronization Signal) ve RS (Reference Signal) sinyalleridir. Bir LTE kod çözücünün yardımı ile bu sinyaller, alınan baz istasyonu sinyalinden filtre edilebilir. Gerçek trafikten bağımsız olarak sabit güçle iletildiklerinden, bu sinyallerin maruziyet hesaplamaları baz istasyonunun azami yüküne ekstrapolasyonu temel alınarak gerçekleştirilir. Bu sinyallerden en önemlisi RS sinyalidir. Çünkü RS sinyalleri, en kararlı ve MIMO anten kanallarına göre ayrılabilen sinyallerdir. Kod çözücü yöntem ile RS sinyalleri tarafından kaynak elemanı (RE) başına üretilen alan şiddeti belirlenebilir. Ölçüm, spektrumun tanımlanmış bir kısmının ortalaması alınarak yapılır ve ekstrapolasyon faktörü ile maksimum maruz kalma, ölçüm değerlerinden hesaplanabilir [27].

Bir LTE kanalında kod çözücü ölçüm, yalnızca ayarlı kanal bant genişliği (CBW) üzerinden ortalama bir RS elemanının gücünü ölçer. RS kodunun çözülmesinin yapılacağı kaynak şebekeden gelen alt taşıyıcıların sayısı, "CBW" için seçilir. Örneğin, 10 MHz'lik bir kanal bant genişliğine sahip bir LTE-800 sinyali ölçülecekse, CBW ayarı 10 MHz'den daha fazla olmamalıdır. Ancak, daha küçük CBW değerleri kullanılabilir. 1,4 MHz'lik en düşük ayarda (1,08 MHz'lik bir sinyal bant genişliğine karşılık gelir), ölçüm cihazı RS'i

yalnızca merkez frekansın etrafındaki 72 alt taşıyıcı aralığında çözer. Kanal bant genişliğinin seçimi tarama süresini etkileyeceği için, tarama yöntemi ile gerçekleştirilecek ölçümlerde genellikle kanal bant genişliği 1,4 MHz seçilir. LTE kanalının çözümünde yalnızca ayarlı kanal bant genişliği üzerinden ortalama bir RS elemanının gücü ölçüldüğünden, sistem için en yüksek çalışma yüküne göre hesaplanmalıdır. Ölçülen her bir hücre için, bir maksimum değerlendirme faktörü (K_i) oluşur. Bu faktör denklik (11)'deki gibi, mümkün olan maksimum kanal çıkış gücü ve bir RS elemanının ortalama gücü arasındaki logaritmik güç oranını dikkate alır [28].

$$K_i[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{maks,i}}{P_{RS,i}} \right) \quad (11)$$

Her anten için ekstrapolasyon faktörü K_i hesaplanır ve denklik (12)'deki gibi ölçüm sonuçları ilgili ekstrapolasyon faktörü ile hesaplanır.

$$E_{i,maks}[dB\mu V/m] = E_{i,RS}[dB\mu V/m] + K_i[dB] \quad (12)$$

Burada K_i , i numaralı antene ait ekstrapolasyon faktörü, $P_{maks,i}$, antenin maksimum gücü, $P_{RS,i}$ ise anten referans sinyalinin gücü olarak tanımlanır. Eğer ölçüm sırasında tüm alt taşıyıcılar aynı güç değerine ayarlanmışsa (yani "RS yükseltme" olmazsa), maksimum sinyal gücü, kaynak eleman başına RS sinyali gücünün, alt taşıyıcıların sayısı ile çarpımına eşit olacaktır. Yani ekstrapolasyon faktörü, alt taşıyıcıların sayısı ile aynı olacaktır. Bu durumda bir LTE sinyalinin bant genişliğinin bir alt taşıyıcıya (15 kHz) oranına göre hesaplanmış ve kullanılacak olan ekstrapolasyon faktörleri Tablo 1'deki gibi olacaktır. Ancak alt taşıyıcıların aynı güç değerine ayarlanmadığı yani RS sinyallerinin gücünün artırıldığı (tipik olarak 3 dB RS yükseltme) durumlarda maruziyet seviyesi tahmininin normalden daha yüksek olmasını önlemek için ise Tablo 2'deki gibi 3 dB azaltılmış ekstrapolasyon faktörleri kullanılacaktır.

Tablo 1. Ekstrapolasyon faktörleri (RS yükseltmesiz)

Kanal Bant Genişliği (CBW) (MHz)	Sinyal Bant Genişliği (SBW) (MHz)	Ekstrapolasyon Faktör	Ekstrapolasyon Faktör (dB)
1,4	1.08	72	18.6
3	2.7	180	22.6
5	4.5	300	24.8
10	9	600	27.8
15	13,5	900	29.5
20	18	1200	30.8

Tablo 2. Ekstrapolasyon faktörleri (3dB RS yükseltmeli)

Kanal Bant Genişliği (CBW) (MHz)	Sinyal Bant Genişliği (SBW) (MHz)	Ekstrapolasyon Faktör	Ekstrapolasyon Faktör (dB)
1,4	1.08	36	15.6
3	2.7	90	19.6
5	4.5	150	21.8
10	9	300	24.8
15	13,5	450	26.5
20	18	600	27.8

3. Karşılaştırma Ölçümleri

Bu çalışma, TÜBİTAK UME, Elektromanyetik Laboratuvarı ile Almanya/Regensburg'da bulunan elektromanyetik kirlilik ölçümleri konusunda uzman, referans bir laboratuvar arasında gerçekleştirilen bir karşılaştırmanın sonuçlarını açıklamaktadır. Karşılaştırmanın amacı, farklı konumlardaki GSM / UMTS / LTE baz istasyonlarından gelen sinyallerin oluşturduğu RF maruziyetin frekans seçici ölçüm yöntemiyle ölçülmesi ve değerlendirilmesidir. Ölçümler, karşılaştırmaya katılan ekipler tarafından aynı ölçüm noktalarında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm verilerinin toplanmasından sonra sonuçlar her iki laboratuvar ekibi tarafından paralel olarak değerlendirilmiştir. Her ölçüm noktası için mevcut tüm sinyaller ICNIRP 1998 maruz kalma referans seviyeleri ile karşılaştırılmış ve bir Excel elektronik tablosu kullanılarak toplama yapılmıştır [29,30]. Son olarak, toplam maruz kalma oranı (TEQ) hesaplanarak iki laboratuvarın ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Karşılaştırma ölçümleri, Almanya/Bayreuth'da, kuru ve güneşli hava koşullarında 25 - 27 Şubat 2019 tarihleri arasında yapılmıştır.

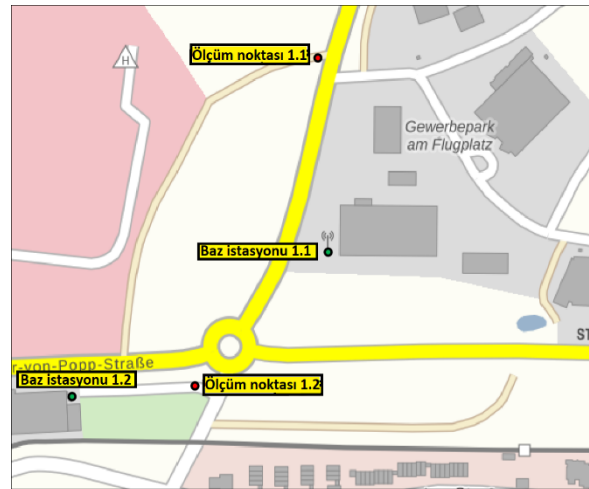
3.1. Ölçüm Noktaları

Karşılaştırma ölçümleri 95445 Bayreuth, Almanya'da Şekil 8'de harita üzerinde işaretlenmiş 4 farklı konumda, her konum için belirlenen iki farklı ölçüm noktasında gerçekleştirilmiştir. Seçilen tüm ölçüm noktalarının ortak özelliği baz istasyonlarının antenlerine doğrudan bakan dış mekan noktaları olmasıdır.



Şekil 8. Ölçüm gerçekleştirilen bölgelerin konumu

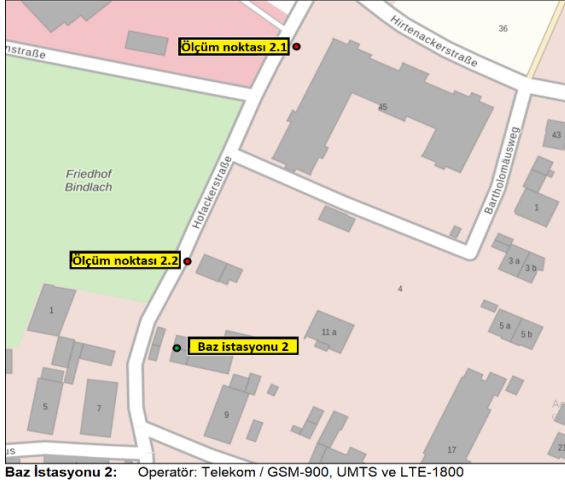
Belirlenen konumlarda maruziyet ölçümü gerçekleştirilen baz istasyonlarına ait detaylar ve her bir konumdaki ölçüm noktaları Şekil 9 ile Şekil 12 arasında verilmiştir.



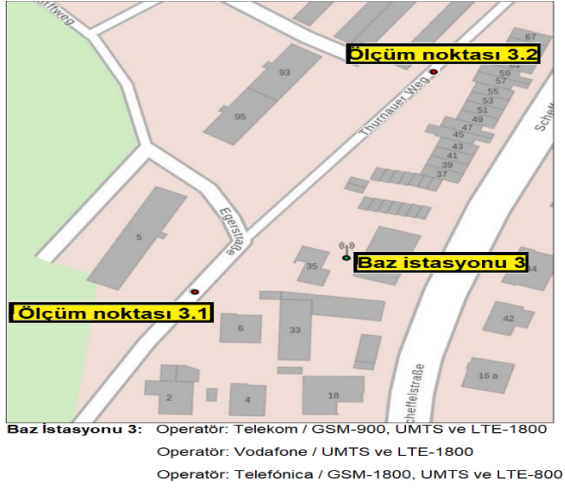
Baz İstasyonu 1.1: Operatör: Telefonica / GSM-900 ve UMTS

Baz İstasyonu 1.2: Operatör: Telekom / GSM-900 ve UMTS

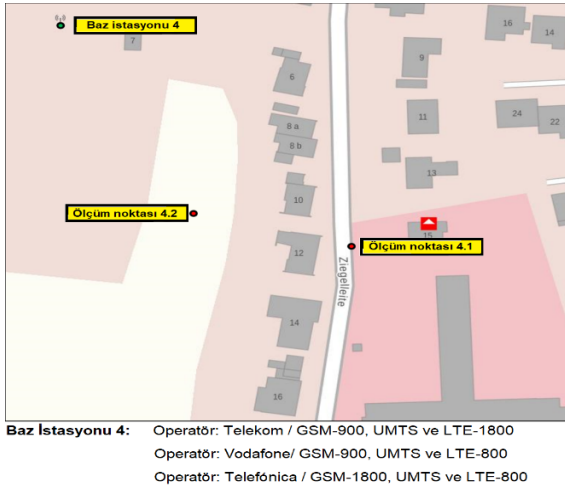
Şekil 9. 1. ölçüm konumuna ait baz istasyonları ve ölçüm noktaları



Şekil 10. 2. ölçüm konumuna ait baz istasyonu ve ölçüm noktaları



Şekil 11. 3. ölçüm konumuna ait baz istasyonu ve ölçüm noktaları



Şekil 12. 4. ölçüm konumuna ait baz istasyonu ve ölçüm noktaları

3.2. Kullanılan Ekipmanlar ve Ölçüm Prosedürü

Karşılaştırma ölçümleri sırasında referans laboratuvar ve TÜBİTAK UME tarafından sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4'te verilen ekipmanlar kullanılmıştır.

Tablo 3. Referans laboratuvar ölçüm ekipmanı

Ekipman	Üretici	Tip	Seri No.	Kalibrasyon Tarihi
SRM-3006	NARDA STS	UMTS ve LTE için kod çözümü ölçüm seçeneği olan 9 kHz - 6 GHz taşınabilir spektrum analizörü	C-0034	12/2018
3AX 27M-3G	NARDA STS	Üç eksenli E-Alan Probu 27 MHz - 3 GHz	D-0043	12/2018

Tablo 4. TÜBİTAK UME/Elektromanyetik laboratuvarı ölçüm ekipmanı

Ekipman	Üretici	Tip	Seri No.	Kalibrasyon Tarihi
SRM-3006	NARDA STS	UMTS ve LTE için kod çözümü ölçüm seçeneği olan 9 kHz - 6 GHz taşınabilir spektrum analizörü	D-0294	03/2018
3AX 27M-3G	NARDA STS	Üç eksenli E-Alan Probu 27 MHz - 3 GHz	M-0433	03/2018

Ölçümlere başlamadan önce her iki ölçüm ekibi de ölçüm cihazları için, ilk olarak cihazın son yazılım versiyonunu yüklemiş, sonrasında ise aynı ölçüm ayarlarını yapmışlardır. Ölçümlerde, spektrum analizör ve uygun bir alıcı antenle, incelenen radyo servislerinin frekans ve sinyal seviyesi, ölçüm noktasında değerlendirilmiştir. Alınan seviyeden ve antenin kalibrasyon verilerinden ölçüm noktasındaki alan şiddeti otomatik olarak hesaplanarak cihaz tarafından görüntülenmiştir. Ölçümler sırasında, tarama metodu (sweeping method) kullanılmıştır. Spektrum analizör "Max Hold" moduna alınmış, alıcı anten yavaşça ölçüm hacminde hareket ettirilerek (yükseklik ≈ 0.8 m - 2.0 m, çap en az 1 m) ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, ölçüm sonucu ekranında hiçbir değişiklik olmadığı gözlemlenene kadar devam ettirilmiş, maksimum ölçüm seviyesi tespit edildiğinde bitirilmiştir. Bu yöntem ile ölçüm cihazı, ölçüm hacmi içindeki maksimum maruziyeti güvenilir bir şekilde algılamış ve kaydetmiştir. Tarama yöntemi ile yapılan ölçümler zemine, tavana, duvarlara ve metal nesnelere en az 50 cm uzaklıktaki mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçüm noktasında, baz istasyon antenleri tarafından üretilen maruz kalma değerleri ICNIRP 1998 standardı tarafından verilen toplama formülüne uygun olarak hesaplanmış ve toplam maruz kalma oranı (TEQ) elde edilmiştir. Düşük seviyelerinden dolayı toplam maruziyete katkısı olmayan sinyaller ihmal edilmiştir.

Dört farklı bölgede yapılan karşılaştırma ölçümlerinin tamamında aynı ekipmanlar kullanılmış ve aynı ölçüm prosedürüne göre ölçümler gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma ölçümlerine ait örnek resimler Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. Karşılaştırma ölçümleri, a) 1. ölçüm konumu, b) 2. ölçüm konumu, c) 3. ölçüm konumu, d) 4. ölçüm konumu

3.3. Ekstrapolasyon Faktörlerinin Belirlenmesi

Cep telefonu baz istasyonları tarafından üretilen elektromanyetik alanlar zamanla sabit değildir, ancak trafikle ve bağlantı kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Geceleri, maruziyet seviyesi sistemlerin sürekli olarak iletilen sinyalleri ile ortaya çıkan asgari değere düşmektedir. Ancak maruziyetin tespiti için ölçümler, en kötü durum yani baz istasyonunun en yüksek operasyonel durumunda performans gösterdiği durum baz alınarak gerçekleştirilmelidir. Karşılaştırma ölçümleri sırasında bu durumu sağlayabilmek için GSM, UMTS ve LTE sinyalleri için ekstrapolasyon faktörleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

3.3.1. GSM

Birden fazla verici kanalına sahip olan GSM baz istasyonlarında, kanal 1 (yayın kontrol kanalı, BCCH) maksimum verici gücüyle sürekli çalışırken, 2. kanaldan itibaren değişken iletim gücüyle çalışmaya başlar. Ölçülen anlık maruziyetten maksimum olası maruziyete ekstrapolasyon yapmak için, her bir sektör antenin BCCH kanalı tarafından oluşturulan pozlama, kurulu gerçek kanal sayısı ile birleştirilmiştir. Hesaplamalar sırasında ekstrapolasyon için, radyo hücresi başına 4 GSM kanalı olduğu varsayılmıştır.

3.3.2. UMTS

UMTS baz istasyonlarında, mevcut trafik ne olursa olsun, tanımlanmış ve sabit güçle iletilen bir sinyalizasyon sinyali ("Ortak Pilot Kanalı", CPICH) vardır. Mevcut her CPICH

sinyalinin alan şiddeti, bir "kod çözücü" ölçümü ile belirlenmiştir.

Maksimum maruz kalma, ölçülen CPICH maruziyetinin ekstrapolasyon faktörü ile çarpımı ile elde edilir. Buradaki ekstrapolasyon faktörü, radyo hücresi UMTS sinyallerinin maksimum verici gücünün, hali hazırda ölçülen CPICH sinyalinin kullanılan gücüne oranı ile belirlenir. Hesaplamalar sırasında ekstrapolasyon faktörleri 10 veya 20 olarak kabul edilmiştir.

3.3.3. LTE

UMTS ile kıyaslandığında, bir LTE baz istasyonunun gerçek aktarılan gücü de trafik yüküyle birlikte değişir. Bu nedenle, LTE için, her sektör anteni ve MIMO yolu için mevcut trafikten bağımsız olarak (RS0 ve RS1) tanımlanmış ve sabit güce sahip bir referans sinyali belirlemek için özel bir kod seçici ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bant genişliği 9 MHz olan LTE sinyalleri için ekstrapolasyon faktörü 600 olarak, 18 MHz bant genişliğine sahip sinyaller için ise ekstrapolasyon faktörü 1200 olarak kabul edilmiş ve bu faktörler ile ölçüm sonuçları ekstrapolasyona tabi tutulmuştur.

4. Ölçüm Sonuçları

Karşılaştırma ölçümleri sırasında, dört farklı konumdaki ölçüm noktaları için mevcut tüm sinyaller ICNIRP 1998 maruz kalma referans seviyeleri ile karşılaştırılmış ve Şekil 14'te örneği verilen bir Excel elektronik tablosu kullanılarak toplama yapılmıştır.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Signal Frequency [MHz]	Scz Code (UMTS) Cell ID-RS No. (LTE)	Operator	Signal type	Limit [V/m]	E (measured) [dB/μV/m]	Meas. Uncertainty [dB]	Factor max. Immission	E _{max} [dB/μV/m]	E _{max} [V/m]	E _{max} Limit consumpt. [μW]
925.4	n.a.	Telefonica	GSM-900	41.8	124.7	3.0	4.0	133.7	4.8	11.6
932.6	n.a.	Telefonica	GSM-900	41.8	104.9	3.0	4.0	114.0	0.5	1.2
942.6	n.a.	Telefonica	GSM-900	41.8	101.7	3.0	4.0	110.7	0.3	0.8
942.6	n.a.	Telekom	GSM-900	42.3	114.0	3.0	4.0	123.1	1.4	3.4
947.6	n.a.	Telekom	GSM-900	42.3	94.0	3.0	4.0	103.0	0.1	0.3
952.0	n.a.	Telekom	GSM-900	42.3	96.0	3.0	4.0	105.0	0.2	0.4
2112.8	70	Vodafone	UMTS-2100	61.0	98.8	3.0	20.0	114.8	0.5	0.9
2112.8	3	Vodafone	UMTS-2100	61.0	82.9	3.0	20.0	98.9	0.1	0.1
2112.8	143	Vodafone	UMTS-2100	61.0	86.7	3.0	20.0	102.7	0.1	0.2
2112.8	56	Vodafone	UMTS-2100	61.0		3.0	20.0	16.0	0.0	0.0
2157.2	500	Telefonica	UMTS-2100	61.0	111.0	3.0	10.0	124.0	1.6	2.6
2157.2	471	Telefonica	UMTS-2100	61.0	87.7	3.0	10.0	100.7	0.1	0.2
2157.2	497	Telefonica	UMTS-2100	61.0		3.0	10.0	13.0	0.0	0.0
2167.2	61	Telekom	UMTS-2100	61.0	106.1	3.0	20.0	122.1	1.3	2.1
2167.2	349	Telekom	UMTS-2100	61.0	81.3	3.0	20.0	97.3	0.1	0.1
2167.2	283	Telekom	UMTS-2100	61.0		3.0	20.0	16.0	0.0	0.0
2167.2	440	Telekom	UMTS-2100	61.0	77.0	3.0	20.0	93.0	0.0	0.1
								Summation:TEQ [μW]		1.6
								Summation:TEQ [μW]		12.6

Şekil 14. Hesaplamaların yapıldığı Excel elektronik tablosu

Üç gün boyunca yapılan karşılaştırma ölçümlerinde, ölçüm noktalarında ekipler tarafından belirlenen ve ekstrapolasyon faktörleri kullanılarak hesaplanan toplam maruz kalma değerleri Tablo 5'te özetlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sitenin maksimum operasyonel durumu için maksimum maruziyet baz istasyonunun maksimum olası telefon ve veri trafiğiyle mümkün olan en yüksek iletim gücünde çalıştığı varsayılmıştır.

Tablo 5'te her bir ölçüm noktasında referans laboratuvar ve TÜBİTAK UME tarafından elde edilen ölçüm sonuçlarının mutlak alan şiddeti değerleri gösterilmemiş, sadece ICNIRP

Aynı zamanda, ülkemizde gerçekleştirilen elektromanyetik kirlilik ölçümlerinde kullanılan geniş bant ölçüm yönteminin sakıncalarını ortaya koymuş, maruziyet ölçümlerinde Avrupa da aktif olarak kullanılan frekans seçici/kod çözücü ölçüm yönteminin daha uygun bir yöntem olduğunu göstermiştir. Karşılaştırma ölçümleri sonucunda elde edilen olumlu veriler, elektromanyetik kirlilik ölçümlerinde frekans seçici/kod çözücü ölçüm yönteminin kullanılmasına geçiş için önemli bir adım olacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek'e bu yazıda incelenen konularla ilgili vermiş olduğu teknik destek ve yardımcı önerileri için teşekkür eder.

The authors would like to thank Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek for his technical support and helpful advice on the issues examined in this paper.

Kaynaklar

- [1] Cooper T. G., Mann S. M., Khalid M., Blackwell R. P., "Exposure of the General Public to Radio Waves near Microcell and Picocell Base Stations for Mobile Communications, Final Report", National Radiological Protection Board, Report Nr. NRPB-W62, Chilton, U.K, 2004.
- [2] Tektaş, C. B., & Aslan, M. H. EM "Kirlilik Ölçümü İçin Geniş Bant ve Frekans-Seçici Ölçümlerin Karşılaştırılması", EMO BİLİMSEL DERGİ, 7(14), 5-12, 2017.
- [3] Cooper T. G., Mann, S. M., Blackwell, R. P., Allen S. G., "Occupational exposure to electromagnetic fields at radio transmitter sites", Health protection Agency Report HPA-RPD-026, UK, June 2007.
- [4] Müllner W., Neubauer G., Haider H., (2000), "Add3D, a new technique for precise power flux density measurements at mobile communications base stations", ARC Seibersdorf Research GmbH, February 2000.
- [5] Tektaş, C. B., Aslan, M. H., Çakır, S. "Baz İstasyonu Civarında UMTS (3G) Ölçümü İçin Geniş Bant Ve Frekans-Seçici Ölçümlerin Karşılaştırılması", URSTÜRKİYE'2018 IX. Bilimsel Kongresi, KTO Karatay Üniversitesi, Konya, 6-8 Eylül 2018.
- [6] Bornkessel C., Wuschek M., (2006), "Exposure measurements of modern digital broadband radio services", German Microwave Conference, 1-4, Karlsruhe/Germany, 28-30 March 2006.
- [7] Henderson S.I., Bangay M. J., "Survey of RF Exposure Levels from Mobile Telephone Base Stations in Australia", Bioelectromagnetics, 27, (1), 73-76, 2006.
- [8] Fanning C. W., "Evaluating Cell Phone and Personal Communications Equipment and their EMC Effects on Automotive" Audio and In-Cabin Modules", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, HI, USA, 9-13, July 2017.
- [9] Khalifa T. A. B., Alnabi A. B. A., "Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station", International Journal of Science and Research (IJSR), 4, (1), 1125-1132, 2015.
- [10] Zhang, X., Yang, G., Wang, X., & Li, B. A Dual-Band And Dual-Polarized Antenna Array for 2G/3G/LTE Base Stations. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 26(2), 154-163, 2016.
- [11] Wuschek M., (2017), "Frequency Selective Measurements of Human Exposure to RF Electromagnetic Fields". EMF Measurement Training Course, Part 5 - 6, November 2017.
- [12] Sandıkçı, G., "Radiation Measurement to Base Stations", Graduate Thesis, Rize University, Department of Physics, 39-45, 2011.
- [13] Genç O., Bayrak, M., Yaldiz, E., "Analysis of the Electromagnetic Pollution for a Pilot Region in Turkey", J. Electromagnetic Analysis & Applications, 2: 139-144 2010.
- [14] Sahin M. E., As N., Karan Y., "Selective Radiation Measurement for Safety Evaluation on Base Stations". Gazi University Journal of Science, 26, (1), 73-83, 2013.
- [15] Genc O., Bavrak M., Yaldiz E., "Analysis of the effects of GSM bands to the electromagnetic pollution in the RF spectrum", Progress in Electromagnetics Research, 101, 17-32, 2010.
- [16] Neubauer G., Lamedschwandner K., Cecil S., Schmid G., "Exposure assessment methods for emerging new technologies", Proc. XXIX URSI General Assembly, 1-4, 2008.
- [17] Ozovehe A., Usman A. U., Hamdallah A., "Electromagnetic Radiation Exposure From Cellular Base Station: A Concern For Public Health", Nigerian Journal of Technology, 34, (2), 355-358, 2015.
- [18] Nitu, V. Electromagnetic field exposure from GSM and UMTS indoor base stations. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 332, pp. 98-103). Trans Tech Publications, 2013.
- [19] NARDA, "GSM measurements with the Selective Radiation Meter SRM-3000", NARDA, Narda Safety Test Solutions GmbH, Germany, 2007.
- [20] Sanchez M.G., Alejos A.V., Cuias I., "Urban wide-band measurements of the UMTS electromagnetic environment," IEEE Trans. on Vehicular Technology, 53, (4), 1014-1022, 2004.
- [21] Martens L., Olivier C., "Accurate electromagnetic exposure assessment around UMTS base stations with a spectrum analyzer", In Proceedings of the 18th General Assembly of International Union Radio Science (URSI), 2005.
- [22] Olivier C., Martens L., "Optimal settings for frequency-selective measurements used for the exposure assessment around UMTS base stations", IEEE transactions on instrumentation and measurement, 56, (5), 1901-1909, 2007.
- [23] NARDA, "UMTS measurements with the Selective Radiation Meter SRM-3000", NARDA, Narda Safety Test Solutions GmbH, Germany, 2008.
- [24] Olivier C., Martens L., "Measurement and processing techniques for the exposure assessment of electromagnetic fields of base stations using spread-spectrum modulation", Proc. GA Int. Union Radio Science, 2002.
- [25] Bornkessel C., "Immission measurements in the vicinity of LTE base stations", Narda Safety Test Solutions GmbH, Germany, 2013.
- [26] Bornkessel C., Hein M., Wuschek M., (2015), "Measurement of human exposure to LTE base stations present status and future challenges in measurement methodology". In Microwave Conference (EuMC), 881-884, Paris, France, September 2015.
- [27] Pythoud F., and Mühlemann B., "Measurement method for LTE base stations," METAS-report 2012-218-808, Bern, May 2012.
- [28] Verloock L., Joseph W., Gati A., Varsier N., Wiart J., Martens L., and Hansson B., "Low-cost extrapolation method for maximal LTE radio base station exposure

estimation: test and validation”, Radiation Protection Dosimetry, pp. 1-5, doi:10.1093/rpd/ncs307, 2012.

- [29] EN 50492, “Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations,” EN 50492:2008 + A1:2014.
- [30] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure To Time Varying Electric, Magnetic, And Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)”, Health Physics, 74, (4), 494–522, 1998.

**Dr. Mustafa Çetintaş**

Mustafa Çetintaş, 1992 yılında ODTÜ Fizik Bölümünden mezun olmuştur. Kocaeli Üniversitesi Fizik bölümünden 1998 yılında yüksek lisans derecesini, doktora derecesini ise Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünden 2003 yılında almıştır. 1993 yılından itibaren TÜBİTAK UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü)'de çalışmaktadır. Güncel araştırma konuları arasında mikrodalga atomik frekans standartları, lazer spektroskopisi çalışmaları, lazerlerin frekans stabilizasyonunun artırılması ve metrolojik uygulamaları ve elektromanyetik metroloji yer almaktadır.

**Cafer Bahadır Tektaş**

2014 yılında Beykent Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisans derecesini ise Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı Metroloji Programında 2018 yılında tamamlamıştır. 2014 yılından itibaren Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Elektromanyetik Laboratuvarı'nda araştırmacı olarak görev almaktadır. Çalışma alanları arasında sivil ve askeri EMC testleri/ölçümleri ve eğitimi, elektromanyetik metroloji konuları ve geniş band/frekans seçici elektromanyetik kirlilik ölçümleri bulunmaktadır.