

Ses Dosyalarının Akustik Şebeke Gürültüsü Tabanlı Adli Kanıt Analizi

Forensic Analysis of Digital Audio Recordings based on Acoustic Mains Hum

Saffet Vatansever¹, Ahmet Emir Dirik²

¹Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye
{edirik}@uludag.edu.tr

Özetçe —Elektrik Şebeke Frekansı (ENF), şebekede harcanan gücün üretilen güce oranla artıp azalmasına bağlı olarak nominal frekans (50/60 Hz) etrafında anlık salınımlar yapar. Elektrik şebeke gerilimi kaynaklı elektromanyetik alan veya akustik şebeke gürültüsünün olduğu bir ortamda yapılan ses kayıtlarına ENF kaynaklı bir gürültü bileşeni eklenmektedir. Bu bileşen yardımı ile bir ses dosyasının hangi gün ve saat kayıt edildiği doğrulanabilmektedir. Bu çalışmada, ev ve iş yerlerinde sıklıkla kullanılan cihazların yaymış olduğu akustik gürültüler analiz edilerek ses kayıtlarında akustik gürültü kaynaklı ENF gürültüsünün varlığı ve kestirimi araştırılmıştır. Kestirimi yapılan ENF sinyallerinin şebekeye bağlı bir devre yardımı ile elde edilen referans ENF ile benzerlikleri ölçülerek dosya kayıt zamanlarının doğru bir şekilde tespit edilebilirliği incelenmiştir. Akustik şebeke gürültüsüne karşı dinamik ve elektret mikrofonların davranışı araştırılmış, ses kayıtları üzerinden kayıt ortamı ve kayıt cihazı hakkında ne ölçüde bilgi sahibi olunabileceği incelenmiştir. Sosyal medyalarda yüklü videolardan ENF sinyali kestirimi de bu çalışma kapsamında ayrıca araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler—ENF, elektrik şebeke frekansı, ses tabanlı adli kanıt analizi, akustik şebeke gürültüsü.

Abstract—ENF (Electrical Network Frequency), fluctuates instantaneously from its nominal value (50/60 Hz) depending on an increase or decrease in power consumption as against power production in the grid network. An ENF-sourced noise component is added into audio recordings where mains power sourced electromagnetic field or acoustic mains hum exists. With the use of this component, recording date and time of an audio file can be verified. In this work, existence and estimation of the acoustic mains hum sourced ENF noise in audio files is studied by analysing the acoustic noise emitted by several devices that are frequently used at home or in workplace. Detection of the file recording time truly is examined by computation of the similarity between the ENF signals estimated from the audio recordings and the reference ENF obtained with the help of a circuit that is connected to power grid network. The behaviour of dynamic microphone and electret microphone towards acoustic mains hum is investigated and the extent of acquiring the information about recording device type and settings from audio files is analysed. Besides, as part of this work, ENF estimation from videos on social media is also investigated.

Keywords—ENF, electric network frequency, audio forensics, audible hum, mains hum.

978-1-5090-1679-2/16/\$31.00 ©2016 IEEE

I. GİRİŞ

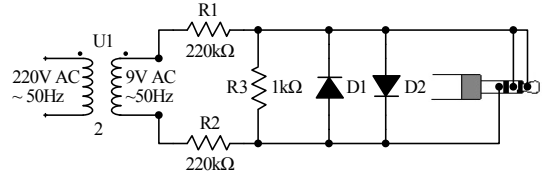
Sayısal ses kayıtlarının adli analizi ve kayıt zamanı tespiti için son yıllarda geliştirilen en önemli araçlardan biri Grigo-ras'ın önerdiği ENF (Electrical Network Frequency) kriteridir [1]. Bu yöntem, elektrik şebeke frekansının rastgele olarak belli bir tolerans aralığı içinde sürekli değişmesi ve aynı şebeke üzerindeki her noktada bu değişimin aynı değerde ölçülebilmesi esasına dayanmaktadır. Elektrik şebeke gerilimi kaynaklı elektromanyetik alanın ya da akustik şebeke gürültüsünün olduğu bir ortamda yapılan ses kayıtlarına ENF sinyali gürültü olarak eklenmektedir. Herhangi bir ses kaydında ortamdan kaynaklanan ENF gürültüsüne ait frekans değişimleri hassas olarak ölçüldüğü takdirde ilgili kayıdın hangi bölgede, hangi gün ve saatte kayıt edildiği tespit edilebilir [1].

Elektrik şebeke frekansı (ENF) elektrik üreten jeneratörleri süren türbinlerin dönüş hızları ile doğrudan ilişkilidir. Aynı şebekedeki elektrik üretim sistemleri birbirleri ile senkron çalışır ve şebekede üretilen güç toplamı tüketilen güç toplamına eşit olduğu sürece ENF nominal frekans değerinde (50 veya 60 Hz) sabit kalır [2]. Nominal elektrik frekansı, Türkiye dahil Avrupa'nın büyük çoğunluğunda 50 Hz olup Kuzey Amerika'da 60 Hz'dir. ENF şebekedeki üretim-tüketim gücü dengesizliğine bağlı olarak nominal frekans etrafında sürekli salınımlar yapar. Şebekeyi stabilize etmek için kullanılan yük kontrol mekanizması, ENF değerinin şebeke boyunca her noktada aynı salınımı göstermesini olanaklı kılar. Ayrıca nominal frekans etrafında belirli bir sınırın dışına çıkmasını da engeller. Dolayısıyla, aynı şebeke üzerinde olup da birbirinden çok uzak mesafede olan iki ayrı bölgede ölçülen ENF değerlerinin aynı olması beklenir [3]. Bu sebeple bir elektrik şebekesi üzerinde herhangi bir yerde belirli bir zamanda kaydedilmiş ENF, o an için o şebekedeki ENF'in temsilcisidir. Türkiye'deki elektrik şebekesi enterkonnekte olduğundan, şebeke üzerindeki her noktadaki ENF' in aynı salınımları yapması (50 ± 0.1 Hz aralığında) ve dolayısıyla her noktada elektrik şebeke frekansının aynı olması beklenmektedir [4]. Elektrik şebeke frekansı (ENF) değişimleri, şebeke gerilimi kaynaklı elektromanyetik gürültünün yoğun olduğu bir ortamda dinamik mikrofon (hareketli bobinli-magnetik mikrofon) ile yapılan ses kayıtları üzerinden hassas bir şekilde ölçülebilmektedir [5]. Ancak, şebeke gerilimi kaynaklı elektromanyetik alan şiddetinin yoğun

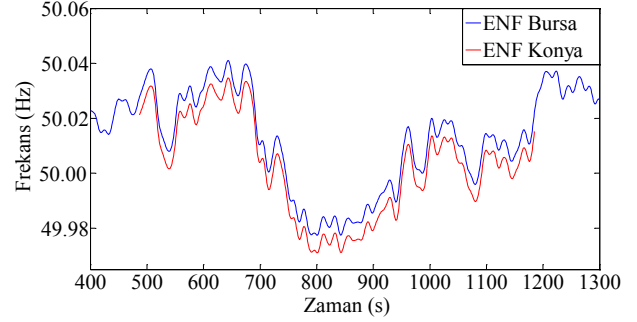
olduğu bir ortamda elektret mikrofonlar (bobin-mıknatıs ikilisi yerine içeriğinde kapasitif malzemeye bulunan) kullanılarak yapılan ses kayıtlarında ENF izine rastlanmamaktadır [6]. Günümüzde özellikle cep telefonlarında dinamik mikrofon yerine kapasitif elektret mikrofonlar kullanıldığından, cep telefonları ile yapılan görüşmeler ve ses kayıtlarında ENF sinyali tespit edilememektedir. ENF kaynaklı elektromanyetik gürültü, ortamda bulunan elektronik devre elemanlarının iç yapısında çeşitli titreşimler oluşturarak akustik şebeke gürültüsü oluşturabilir. Dolayısıyla akustik şebeke gürültüsünün olduğu bir ortamda elektret mikrofonlu cihazlarla yapılan kayıtlar üzerinden şebeke frekansının kestirimi mümkün olabilmektedir [7]. 2013 yılında, Chai ve arkadaşları, elektret mikrofonlu 3 farklı kayıt cihazı ile bir klimanın ürettiği akustik şebeke gürültüsünü kaydederek, ses kayıtları üzerinden ENF'in kestirilebileceğini göstermişlerdir [7]. Fechner ve Kirchner, 2014 yılında, benzer bir çalışma yayınlamış, ancak akustik şebeke gürültüsünü yapay yollardan (iki uçlu RCA ses kablosunun bir ucunu hoparlör ses girişine, diğer ucunu da boşta bırakarak) elde etmiştir [8]. Bildiğimiz kadarı ile hangi tip cihazların akustik şebeke gürültüsü ürettiği ve bu gürültü üzerinden ENF tespiti, adli kanıt bakış açısıyla kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Bu çalışmada, özellikle ev ve iş yerlerinde sıklıkla kullanılan farklı tür cihazların yaymış olduğu ENF kaynaklı akustik gürültülerin kontrollü bir şekilde kayıtları yapılarak hangilerinin ENF sinyali içerdiği ve hangi cihazların akustik şebeke gürültüsü üretip üretmediği araştırılmış, kestirimi yapılan ENF sinyallerinin referans şebeke frekansı ile ne derecede benzerlik gösterdiği analiz edilmiş ve ses kayıt tarih ve saatlerinin ENF üzerinden tespit edilebilirliği incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca Facebook, YouTube gibi sosyal medyada paylaşılan video dosyalarının ses bileşenleri de incelenerek dosya paylaşımı esnasında ses kaydında mevcut olan ENF izinin korunup korunmadığı ve dolayısıyla bu tip dosyaların ses kayıt anını tespit etmede güvenilir bir kaynak olup olmadığı araştırılmıştır.

II. SES KARTI İLE GERÇEK ZAMANLI ENF KESTİRİMİ

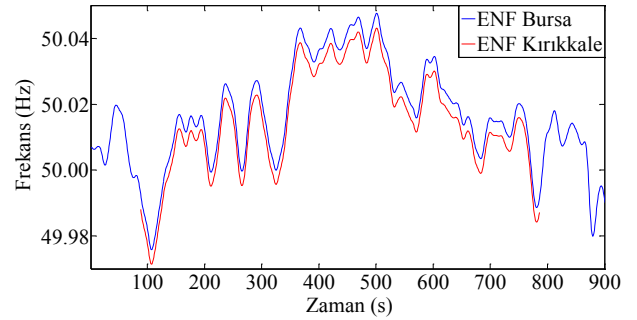
Bu çalışmada gerekli referans ENF veri tabanının oluşturulabilmesi için, elektrik şebeke frekansının anlık olarak okunup zamana bağlı olarak kaydedilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, tasarımı Şekil-1'deki gibi yapılmış olan ENF adaptör devresi PC ses kartına bağlanmıştır. ENF adaptörünün, TRS (mikrofon) tipi konektör aracılığıyla PC ses kartına gönderdiği zayıflatılmış şebeke gerilimi (20mV), Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT-Short Time Fourier Transform) tabanlı frekans kestirim algoritması [9] ile işlenerek şebeke frekansının anlık değişimleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Ses kayıt dosyalarından ENF'in kestirimi de aynı algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Enterkonnekte elektrik dağıtım şebekesine sahip olan ülkemizde, elektrik frekansının şebeke üzerindeki her bir noktada aynı olması beklenmektedir. Bu kapsamda ENF adaptörü ile Türkiye'nin çeşitli şehirlerinden anlık ENF datası toplanmış ve aynı zamanda yapılan ölçümlerle birbirinden çok uzaktaki şehirlerin şebeke frekans değişimlerinin senkron olduğu gözlenmiştir. Şekil 2'de aynı anda **Bursa**'da ve **Konya**'da yapılan ölçümlerde ENF datasının aynı olduğu görülmektedir. Şekil 3'te Bursa'dan ve **Kırıkkale**'den aynı gün ve saatte toplanan ENF sinyallerinin yine birbirleriyle aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 1: ENF kestirimi için ses kartı adaptör devresi.



Şekil 2: ENF adaptörü ile eş zamanlı olarak Bursa ve Konya'da kaydı yapılan ENF sinyalleri karşılaştırması.

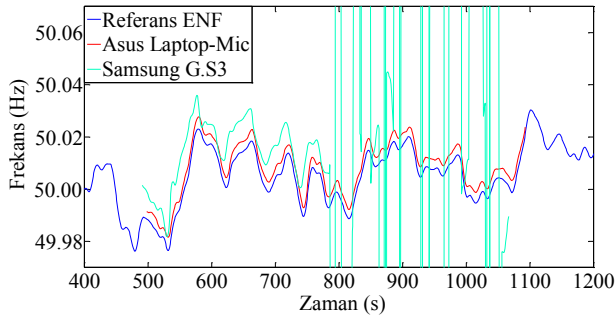


Şekil 3: ENF adaptörü ile eş zamanlı olarak Bursa ve Kırıkkale'de kaydı yapılan ENF sinyalleri karşılaştırması.

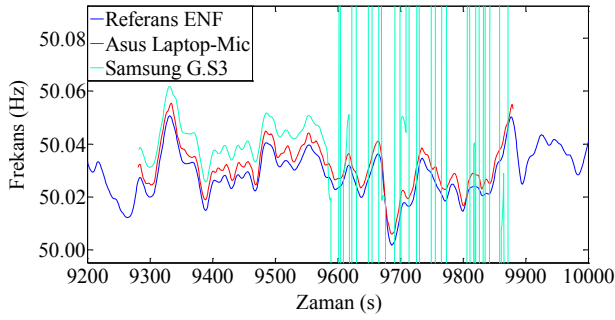
III. AKUSTİK ŞEBEKE GÜRÜLTÜSÜ İLE ENF ANALIZI

A. Akustik Şebeke Gürültüsü Üreten Cihazlar

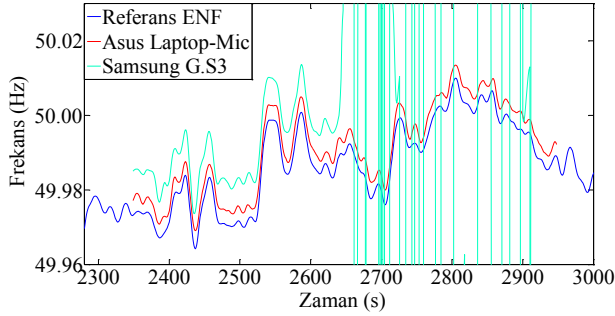
Bu bölümde akustik şebeke gürültüsünün ses kayıtlarına ve ENF kestirimine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda ilk deney, Viessman Vitopend 100 model kombi cihazı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kombi dışında diğer tüm cihazların kapalı olduğu bir ev ortamında, elektret mikrofonlu Samsung Galaxy S3 cep telefonu ve şarj aleti takılı dinamik mikrofonlu Asus K53S laptop ile aynı anda ses kaydı başlatılmıştır. Ses kaydı başlatıldıktan 5 dakika sonra kombi kapatılmış, fakat ses kayıtları 5 dakika daha devam ettirilerek toplam 10 dakika kayıt alınmıştır. Bu ses kayıtlarından elde edilen iki ayrı ENF sinyalinin (Şekil 4), normalize çapraz ilinti yöntemi ile referans ENF veri tabanında ayrı ayrı aranması sonucu her ikisinin de maksimum korelasyon değeri referans ENF sinyalinin (şekilde mavi renkli çizgiler) 498. örneğinde bulunmuştur. Bu çalışmada ENF sinyali 1 saniye aralıklarla kestirilmiştir. Dolayısıyla, referans ENF kayıt altında tutulmaya başlandığı andan sonraki 498. saniyede ses kayıtlarının başladığı sonucuna ulaşılır. Kombi kapalı durumda iken (783.



Şekil 4: ENF kaynaklı akustik gürültü üreten **kombi** açık iken Samsung Galaxy S3 Cep telefonu ve Asus K53S laptopla eş zamanlı başlatılmış toplam 10 dakikalık ses kayıtlarından kestirilen ENF sinyalleri. **773. saniyede kombi kapatılmıştır.**

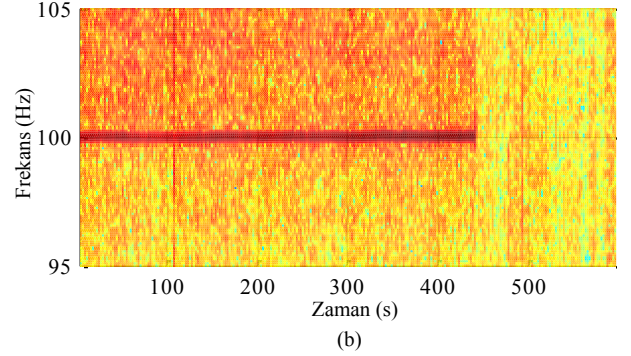
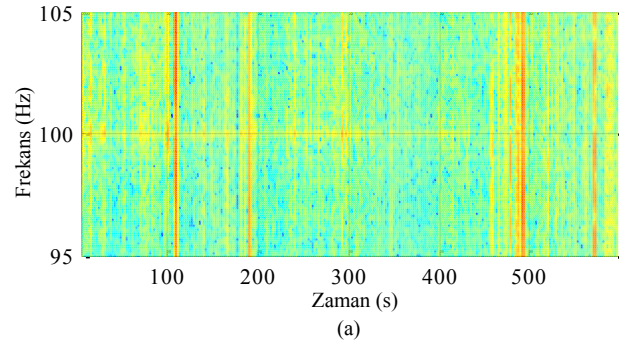


Şekil 5: ENF kaynaklı akustik gürültü üreten **aspiratör** açık iken Samsung Galaxy S3 Cep telefonu ve Asus K53S laptopla eş zamanlı başlatılmış toplam 10 dakikalık ses kayıtlarından kestirilen ENF sinyalleri. **9588. saniyede aspiratör kapatılmıştır.**



Şekil 6: ENF kaynaklı akustik gürültü üreten **elektrik süpürgesi** açık iken Samsung Galaxy S3 Cep telefonu ve Asus K53S laptopla eş zamanlı başlatılmış toplam 10 dakikalık ses kayıtlarından kestirilen ENF sinyalleri. **2627. saniyede elektrik süpürgesi kapatılmıştır.**

saniyeden itibaren) elektret mikrofonlu cep telefonu (şekilde turkuaz renkli çizgiler) ile akustik gürültünün yakalanmadığı ve dolayısıyla ENF in olmadığı Şekil 4'de görülmektedir. Laptopa bağlı dinamik mikrofonla yapılan kayıta ise (şekilde kırmızı çizgiler) akustik şebeke gürültüsü üreten kombi kapalı durumda iken bile ENF in olması laptop ses kaydındaki ENF in kaynağının elektromanyetik alan olduğunun bir göstergesidir. Şekil 4'den görüleceği üzere, her bir kayıttan elde edilen ENF

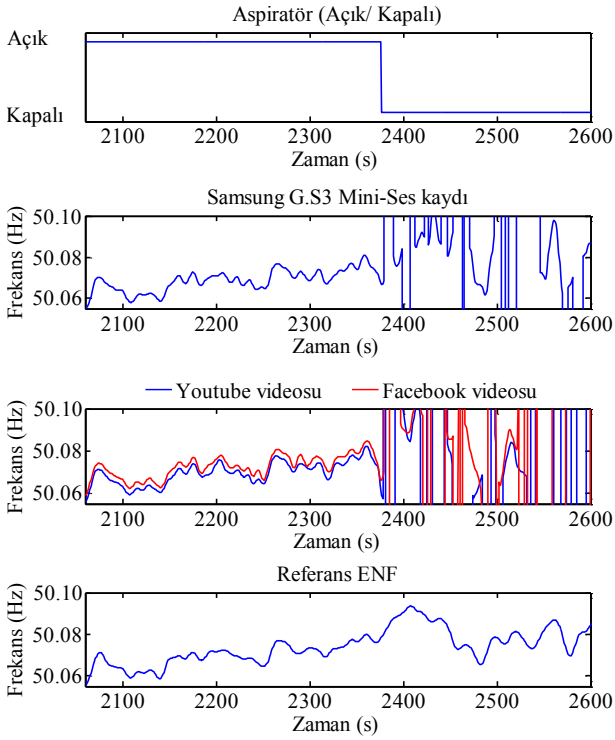


Şekil 7: ENF kaynaklı akustik gürültü üreten kombi açık iken eş zamanlı başlatılmış (a) **dinamik** mikrofon ve (b) **elektret** mikrofon kayıtlarının **100 Hz** bandındaki frekans spektrumlarının karşılaştırması. **443. saniyede kombi kapatılmıştır.**

ile ENF adaptörü kullanılarak şebekeden doğrudan elde edilen ENF'in benzerlikleri dikkat çekicidir. Benzer deney düzenekleri Arçelik P27i model aspiratör ve Arçelik S959 model elektrik süpürgesi için ve tekrarlanmıştır; elde edilen sonuçlar Şekil 5 ve Şekil 6'dan görüleceği üzere kombi için elde edilen sonuçlarla uyumludur. Yukarıdaki cihazlar dahil klima, saç kurutma makinası gibi birçok cihazla yapılan deneyler sonucu en güçlü akustik şebeke gürültüsü kaynaklı ENF harmonisinin 100 Hz bandında olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu bölümde 100 Hz bandından elde edilen ENF değerleri, ENF adaptörü kullanılarak şebekeden doğrudan elde edilen referans ENF ile kıyaslanabilmesi için ikiye bölünmüştür.

B. Şebeke Gürültüsünün Dinamik ve Elektret Mikrofonlara Etkisi

Akustik şebeke gürültüsü yaydığı daha önce doğrulanan Viessman Vitopend 100 marka kombinin ilk 7 dakika açık ardından da 3 dakika kapalı tutulduğu süre zarfında, aynı ortamdaki elektret mikrofonlu Samsung Galaxy S3 marka cep telefonu ve şarj cihazı şebekeye bağlı olmayan dinamik mikrofon takılı (bu sayede laptop çevresindeki elektromanyetik alan şiddeti minimuma indirilmiştir) Asus K53S marka laptop ile eş zamanlı yapılan ses kayıtlarının frekans spektrumları incelendiğinde ENF sinyal güçlerinin birbirinden çok farklı olduğu görülmüştür. Dinamik mikrofon kaydından elde edilmiş olan Şekil 7(a)'daki frekans spektrumuna bakıldığında 100 Hz bandının elektret mikrofonla yapılan kayda göre, Şekil 7(b), çok daha zayıf olduğu görülmektedir. Bu ölçüm, dinamik mikrofonların elektret mikrofonlara göre akustik şebeke gürültüsü analizinde kullanımının uygun olmadığını



Şekil 8: Sosyal medyaya yüklenen videolarda ENF tespiti. ENF izi içeren bir video kaydı YouTube ve Facebook'a yüklenmiş daha sonra indirilerek ENF kestirimi yapılmıştır. Akustik gürültü üreten cihaz **2380. saniyede kapatılmıştır**.

göstermektedir. Şekil 7(a)'da, özellikle 100. saniye etrafındaki gürültünün ENF sinyaline göre şiddetinin çok yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Akustik şebeke gürültüsü üreten cihazın (kombinin) kapalı olduğu durumda (son 3 dk) ENF sinyalinin olmayışı, ENF sinyalini oluşturan gürültünün kaynağının kombi cihazı olduğunu göstermektedir.

C. Sosyal Medyalardaki Videolar

Akustik Şebeke gürültüsü ürettiği daha önce doğrulanan Arçelik P27i marka aspiratörün ilk 5 dakika açık ardından da 4 dakika kapalı tutulduğu süre zarfında aynı ortamdaki Elektret mikrofonlu Samsung Galaxy S3 cep telefonu ile **video kaydı** ve Samsung Galaxy S3 mini cep telefonu ile de **ses kaydı** yapılmıştır. Samsung Galaxy S3 cep telefonu ile yapılan video kaydı daha sonra YouTube ve Facebook'a yüklenmiş, ardından tekrar indirilmiştir. YouTube ile Facebook'tan indirilen bu dosyaların ses bileşenlerinden ve Samsung Galaxy S3 mini cep telefonu ses kaydından kestirimi yapılmış üç ayrı ENF vektörünün normalize çapraz ilinti yöntemi ile referans ENF veri tabanında ayrı ayrı aranması sonucu üçünün de maksimum korelasyon katsayısı referans ENF sinyalinin 2064. saniyesinde bulunmuştur. Dolayısıyla, referans ENF kayıt altında tutulmaya başlandığı andan sonraki 2064. saniyede video ve ses kayıtlarının başlatıldığı sonucuna ulaşılır. YouTube ve Facebook videolarından çıkartılan ENF sinyalinin internete yükleme esnasında bozulmadığı; S3 mini cep telefonu ile yapılan ses kaydından kestirilen ENF ile şebekeden doğrudan elde edilen referans ENF sinyali ile arasında çok yüksek ilinti olduğu Şekil 8'den görülmektedir.

IV. SONUÇ

Enterkonnekte sisteme sahip Türkiye'de elektrik şebeke frekansı üretim-tüketim gücü farkına bağlı olarak 50 ± 0.1 Hz aralığında sürekli değişmektedir. Türkiye'de birbirinden çok uzak bölgelerde yapılan ENF ölçümlerinde her bölgede anlık ENF değerinin aynı olduğu gözlenmiştir. Elektrik şebekesinden beslenen çeşitli cihazların yaymış olduğu gürültülerin analiz edilmesiyle akustik şebeke gürültüsü kaynaklı ENF'in, elektromanyetik alan kaynaklı ENF gibi yüksek doğrulukla kestirimi yapılabildiği ve ses kayıtlarının tarih ve zaman tespitinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Akustik şebeke gürültüsü kaynaklı ENF, en güçlü ikinci harmonikte, yani 100 Hz frekans bandında gözlenmiş olup 50 Hz frekans bandında ENF'in varlığına rastlanmamıştır. Elektret mikrofonla yapılan ses kayıtlarında elektromanyetik alan etkisi görülmemiş olup, bu tür mikrofonlar ile yapılan ses kayıtlarında sadece akustik şebeke gürültüsüne bağlı ENF tespiti yapılabilir. Buna karşın, dinamik mikrofonla yapılan ses kayıtlarında ise ENF kaynaklı elektromanyetik alan girişimi çok yüksek olup, akustik şebeke gürültüsü etkisi çok düşüktür. Buna bağlı olarak ses dosyalarından kestirilen ENF sinyalinin gücüne ve tespit edildiği frekans bandına bağlı olarak kayıt cihazı (elektret ya da dinamik mikrofonlu) ve kayıt ortamı (ortamda akustik şebeke gürültüsü üreten cihazın olup olmadığı) hakkında kayda değer bilgilere ulaşmak mümkündür. Ses dosyalarından kestirilen ENF, dosya içeriğinde oynama olup olmadığının tespiti için de kullanılabilir. ENF, normal şartlarda anlık çok büyük değişimler göstermeyeceğinden, kestirimi yapılan ENF'teki ani ve çok büyük sıçramalar ya da kesintiler dosya üzerinde olası bir dış müdahalenin göstergesi olabilir.

KAYNAKÇA

- [1] C. Grigoras, "Digital audio recording analysis—the electric network frequency criterion," *International Journal of Speech Language and the Law*, vol. 12, no. 1, pp. 63–76, 2005.
- [2] T. Sidhu, "Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 1, pp. 75–81, 1999.
- [3] M. Bollen and I. Gu, *Signal processing of power quality disturbances*. Wiley-Interscience, 2006.
- [4] J. Lehner, "Analysing Inter-Areas Oscillations within the Interconnected Power System of Continental Europe using frequency domain simulations and signal analysis based on wide-area measurement data," *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012*, pp. 445–451, 2012.
- [5] C. Grigoras, "Applications of ENF criterion in forensic audio, video, computer and telecommunication analysis," *Forensic Science International*, vol. 167, no. 2-3, pp. 136–145, 2007.
- [6] E. B. Brixen, "Techniques for the Authentication of Digital Audio Recordings," in *Audio Engineering Society Convention 122*. Audio Engineering Society, may 2007.
- [7] J. Chai, F. Liu, Z. Yuan, R. Connors, and Y. Liu, "Source of ENF in Battery-Powered Digital Recordings," *Audio Engineering Society Convention 135*, 2013.
- [8] N. Fechner and M. Kirchner, "The humming hum: Background noise as a carrier of ENF artifacts in mobile device audio recordings," *Proceedings - 8th International Conference on IT Security Incident Management and IT Forensics, IMF 2014*, pp. 3–13, 2014.
- [9] A. Cooper, "The electric network frequency (ENF) as an aid to authenticating forensic digital audio recordings—an automated approach," *AES 33rd International Conference*, pp. 1–10, 2008.