

VİDEOLARIN ENF TABANLI ADLİ KANIT ANALİZİNE IŞIK KAYNAĞI ETKİSİ

Saffet VATANSEVER *
Ahmet Emir DİRİK **

Alınma: 07.10.2016; düzeltme: 17.02.2017; kabul: 20.02.2017

Öz: Video dosyalarının Elektrik Şebeke Frekansı (Electric Network Frequency - ENF) temelli adli kanıt analizi tekniği, çoklu ortam dosyalarının kayıt zamanını doğrulamada ve dosyalarda yapılan sahteciliği tespit etmede son yıllarda önerilmiş en önemli araçlardan biridir. ENF, şebekede üretilen toplam gücün tüketilen toplam güce göre artıp azalmasına bağlı olarak nominal değer (Avrupa'da 50 Hz) etrafında sürekli salınımlar yapar. Bu salınımlar aynı şebeke üzerindeki her noktada aynıdır. Elektrik şebekesinden beslenen bir ışık kaynağının yaymış olduğu aydınlatma şiddeti elektrik şebeke frekansına bağlı olarak insan gözünün fark edemeyeceği anlık değişkenlikler gösterir. Işık şiddetindeki bu değişimler, video kameralar tarafından yakalanabilmektedir. Çekilen videolardaki tüm resim çerçeveleri boyunca değişmeyen içerik analiz edilerek aydınlatma şiddetinin değişim hızı, dolayısıyla elektrik şebeke frekansı kestirilebilir. Videolardan kestirimi yapılan ENF sinyalinin, elektrik şebekesinden doğrudan elde edilen referans ENF sinyali ile benzerlikleri hesaplanarak dosya kayıt zamanı bilgisine ulaşılabilir. Bu çalışmada, şebeke elektriğine bağlı ışık kaynağı türünün, CCD sensörlü kamera ile çekilmiş videolardan kestirilen ENF sinyali kalitesinde ne derece etkili olduğu incelenmiştir. Işık kaynağı türüne göre, çeşitli uzunluktaki videolarda ENF temelli kayıt zamanı doğrulama performansı analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ENF, elektrik şebeke frekansı, videolarda adli kanıt, video kayıt zamanı doğrulama, ışık kaynağı etkisi

The Effect of Light Source on ENF Based Video Forensics

Abstract: Electric Network Frequency (ENF) based Forensic analysis technique of video files is one of the most significant tools, proposed in recent years, in timestamp verification and forgery detection of multimedia files. ENF fluctuates continuously from its nominal value (50 Hz in Europe) depending on an increase or decrease in total power production as against total power consumption in the grid network. These fluctuations are the same across the entire network. Light intensity emitted by light sources that are connected to power grid, shows instantaneous variations, which cannot be noticed by human eye, depending on electric network frequency. These variations in light intensity can be caught by video cameras. With the analysis of steady content throughout the whole frames of recorded videos, speed of light intensity variations, so power network frequency can be estimated. By computation of the similarity between the ENF signal estimated from video recordings and the reference ENF obtained directly from power grid network, the information of file record time can be accessible. In this work, it is investigated that how much the type of a light source, connected to grid network, is influential in ENF signal quality estimated from video files captured by cameras with CCD sensor. ENF based video record time verification performance in videos of various lengths is analyzed in accordance with light source type.

Keywords: ENF, electric network frequency, video forensics, video timestamp verification, effect of light source

* Bursa Teknik Üniversitesi, DBMM Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 16330 Bursa, Türkiye

** Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 16059 Bursa, Türkiye
İletişim Yazarı: Ahmet Emir Dirik (edirik@uludag.edu.tr)

1. GİRİŞ

Elektrik Şebeke Frekansı (ENF), şebekede üretilen anlık gücün tüketilen güce göre artıp azalmasına bağlı olarak nominal değer (Avrupa'da 50 Hz) etrafında sürekli salınımlar yapar. Elektrik şebekesinde kayıplar dahil toplam tüketimin toplam üretimden daha fazla olması durumunda ENF azalmaya, tersi durumda ise yani üretim miktarının tüketilenden fazla olması durumunda ENF artmaya başlar (Sidhu, 1999). Şebekeye bağlı yük kontrol mekanizması üretim gücünü azaltarak ya da artırarak nominal değerden sapan ENF'yi sürekli olarak nominal değere çekmeye çalışarak frekansın belirli alt ve üst sınırın dışına çıkmasını engeller (Bollen ve Gu, 2006). Avrupa'da bu frekans sınır aralığı normal koşullarda $50 \pm 0,1$ Hz'tir (ENTSO-E, 2013). Aynı şebeke üzerindeki jeneratörler birbirleri ile senkron çalışır ve aynı elektrik şebekesi üzerindeki her noktada ENF aynı değişimleri gösterir (Grigoras, 2007). Dolayısıyla, aynı şebeke üzerinde birbirlerinden kilometrelerce uzaktaki noktalarda bile ENF' in aynı olması beklenir.

Adli kanıt toplama ve analizi kapsamında ses ve video dosyalarının kayıt zamanının doğrulanması ve dosya bütünlüğünün kontrolü büyük önem arz etmektedir. ENF temelli adli kanıt analiz metodu dosya bütünlük kontrolünde ve dosyaların kayıt zamanı tespitinde, son yıllarda önerilmiş en önemli araçlardan biridir (Garg, Varna ve Wu, 2011; Grigoras, 2005). Grigoras (2005, 2007), dinamik mikrofonlu (hareketli bobinli-magnetik mikrofon) bir kayıt cihazıyla elektromanyetik alanın yoğun olduğu ortamlarda (elektrik iletim hatlarının yakınında ya da elektrik şebekesinden beslenen cihazların yakınında) yapılan ses kayıtlarına elektromanyetik alan kaynaklı elektrik şebeke frekansı girişiminin olduğunu keşfetmiştir. Chai ve diğ. (2013), elektromanyetik alanın yoğun olduğu bir ortamda elektret mikrofonlu (bobin-miknatis ikilisi yerine içeriğinde kapasitif malzeme bulunan) kayıt cihazlarıyla yaptıkları ses kayıtlarında ENF'nin varlığına rastlayamamışlardır. Chai ve diğ. (2013) çalışmalarını bir adım öteye taşımış ve elektret mikrofonlu kayıt cihazlarıyla yapılan akustik şebeke gürültüsü (elektrik şebeke geriliminden beslenen bazı cihazların iç devrelerindeki elemanların titreşimi ya da ideal voltaj doğrultucusu eksikliğinden kaynaklanan alternatif akım dalgalanmaları sonucu yaymış oldukları gürültü) kaydından ENF'nin kestiriminin mümkün olduğunu bulmuşlardır. Fechner ve Kirchner (2014), yapmış olduğu deneylerle Chai ve diğ. (2013)'nin bulgularını desteklemiştir. Elektrik şebekesinden beslenen bir ışık kaynağının yaymış olduğu aydınlatma şiddeti elektrik şebeke frekansına bağlı olarak insan gözünün fark edemeyeceği anlık değişimler gösterir. Elektrik şebeke frekansı kaynaklı ışık şiddetindeki bu değişimler, video kameralar ile yakalanabilmektedir. Video boyunca tüm resim çerçeveleri için ortak değişmeyen bölgeler analiz edilerek aydınlatma şiddetinin değişim hızı, dolayısıyla elektrik şebeke frekansı kestirilebilir Garg ve diğ. (2011, 2013). Çoklu ortam dosyalarından çıkartımı yapılan ENF sinyali ile elektrik şebekesinden doğrudan elde edilen ENF sinyali arasındaki benzerlik ilişkisi kontrol edilerek dosya kayıt zamanı bilgisine ulaşılabilir.

Literatürdeki ENF temelli adli kanıt analizi çalışmalarının çoğu ses dosyalarına dayanmakta olup video dosyaları ile çok az çalışma yayınlanmıştır. Bilebildiğimiz kadarıyla, özellikle CCD kamera kaynaklı mevcut çalışmalar çok yetersizdir. Garg ve diğ. (2011, 2013) yalnızca tüp floresan lamba ile aydınlatılmış ortamlarda CCD kamera ile çekilmiş 10 dakika dolaylarındaki video kayıtları üzerinde deneyler yapmışlardır. Oysaki bir videoda ENF sinyali kalitesine her ışık kaynağı floresan tüp lamba gibi aynı katkıyı sağlamıyor olabilir. Ayrıca, test edilmesine ihtiyaç duyulan her video 10 dakika kadar uzunlukta olmayabilir. Bu çalışmada, bir videonun çekildiği ortamda elektrik şebekesine bağlı ışık kaynağı türünün videodan kestirilen ENF sinyali kalitesinde ne derece etkili olduğu araştırılmıştır. Işık kaynağı türüne göre, CCD kamera ile çekilmiş çeşitli uzunluktaki videoların kayıt zamanını ENF bilgisini kullanarak tespit etmede ve/veya doğrulamada başarı oranı incelenmiştir.

2. VIDEO DOSYALARINDAN ENF SİNYALİNİN ÇIKARTIMI

2.1. Işık Kaynağı Aydınlatma Frekansı ile ENF İlişkisi

Işık kaynakları elektrik şebeke geriliminin hem pozitif hem de negatif alternansında ışık yayacağından ışık kaynağı aydınlatma frekansı elektrik şebeke gerilimi frekansının 2 katıdır. Örneğin 50 Hz nominal frekansa sahip bir elektrik şebekesi için aydınlatma frekansının nominal değeri 100 Hz'dir. Türkiye elektrik şebeke frekansının, üretilen güç-harcanan güç dengesizliğine bağlı olarak $50 \pm 0,1$ Hz aralığında değişimler göstereceği düşünülürse ışık kaynağı aydınlatma frekansı $100 \pm 0,2$ Hz aralığında değerler olacaktır.

2.2. Kameralarda Alçak Hızda Örneklemenin ENF'ye Etkisi: Aliasing

Şebeke elektriğine bağlı bir ışık kaynağının aydınlatma şiddeti değişimlerinin kamera ile yakalanabilmesi için ilgili kameranın normal şartlarda Nyquist kriterini (Proakis ve Manolakis, 2007) sağlayacak örnek hızına sahip olması gerekmektedir. Ancak, piyasada (özel amaçlı olanlar hariç) Nyquist kriterini sağlayacak, yani saniyede 200 çerçeve (100 Hz aydınlatma frekansı için) kaydedebilecek bir kamera bulmak çok zor olup kullanıcı kameralarının büyük çoğunluğu 25 fps (çerçeve/saniye) ya da 30 fps dolaylarındadır. Dolayısıyla, örnekleme hızı düşük olan bu tip kameralarla 100 Hz dolaylarındaki aydınlatma frekansı doğrudan elde edilemez. Ancak aydınlatma frekansı, 'aliased' olarak daha düşük frekanslarda kestirilebilir.

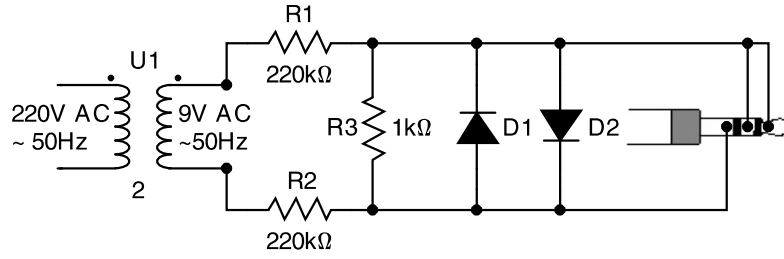
Bu çalışmadaki tüm video kayıtları saniyede 29,97 çerçeve/saniye kaydedebilen Canon PowerShot SX210 IS model CCD sensörlü kamera kullanılarak yapılmıştır. Buna göre nominal frekansı $F=100$ Hz (nominal elektrik şebeke frekansının 2 katı) olan aydınlatma şiddeti $F_s=29,97$ çerçeve/saniye örnekleme hızı ile örneklendiğinde aşağıdaki ayrık zamanlı sinyal elde edilir:

$$\begin{aligned} I(n) &= A \cos\left(2\pi \frac{F}{F_s} n\right) \\ &= A \cos\left(2\pi \frac{100}{29,97} n\right) \\ &= A \cos(6,67334\pi n) \\ &= A \cos((6\pi + 0,67334\pi)n) \\ &= A \cos(0,67334\pi n) \end{aligned} \quad (1)$$

O halde ayrık zamanlı bu sinyalin frekansı $f=0,33667$ devir/örnek olarak bulunur. $F=f \cdot F_s$ olduğuna göre denklem (1)'de elde edilen ayrık zamanlı sinyalin örnekleriyle eşdeğer olacak sinüsoidin $0 < F < F_s/2$ aralığındaki frekansı :

$$\begin{aligned} F &= f \cdot F_s \\ &= 0,33667 \cdot 29,97 \\ &= 10,089 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (2)$$

olarak elde edilir.



Şekil 1:
ENF Adaptörü (Vatansever ve Dirik, 2016)

2.3. Işık Şiddeti Örneklerinin Elde Edilmesi ve ENF Kestirimi

CCD kameralarla çekilmiş videolarda ENF kestirimi, her çerçevenin video boyunca içeriği değişmeyen piksellerinin ortalaması alınması suretiyle ışık şiddeti değişimleri vektörünün elde edilmesine ve elde edilen bu sinyale literatürde bilinen ENF kestirim algoritması uygulanmasına bağlıdır (Garg ve diğ., 2011, 2013). Video boyunca içeriği değişmeyen bölgeler, birbirini izleyen çerçevelerin farklarının ortalaması alınıp belirli bir eşik değerden geçirilmesi yoluyla elde edilebilir. Bu çalışmada elde edilen ışık şiddeti örneklerine Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT) tabanlı ENF kestirim algoritması (Cooper, 2008) uygulanarak elektrik şebeke frekansının anlık değişimleri hesaplanmıştır.

2.4. Bulgular

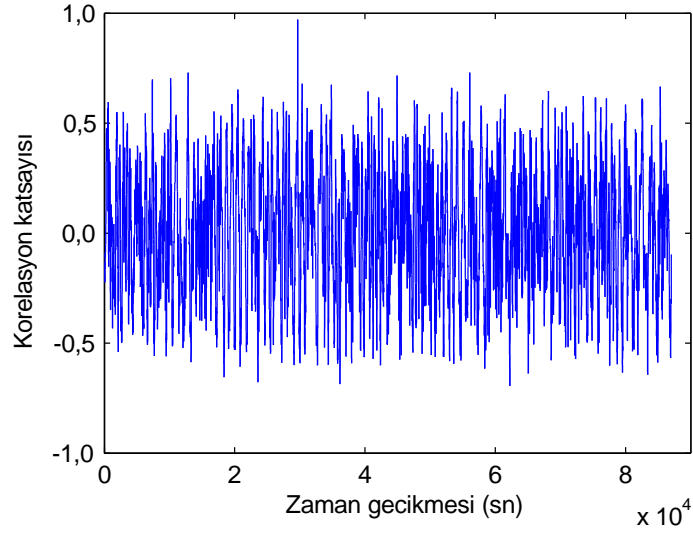
Bu bölümde, 29,97 çerçeve/saniye örnekleme hızına sahip Canon PowerShot SX210 IS model CCD kamera ile 640x480 çözünürlükte çekilmiş düz duvar videosundan (sabit içerikli) ve işlek bir caddede çekilmiş videodan (değişken içerikli) 1 örnek/saniye çözünürlükte ENF sinyali kestirimleri sağlanmıştır. Elde edilen sinyallerin kalitesini değerlendirebilmek amacıyla her bir video için elde edilen ENF vektörü, videoların kayıt zamanını kapsadığı bilinen 24 saatlik referans ENF veri tabanı üzerinde aranarak en yüksek benzerliğin görüldüğü noktada sinyaller analiz edilmiştir. Benzerlik ölçütü hesabı olarak normalize çapraz korelasyon kullanılmıştır.

$$c(k) = \frac{\sum_{n=1}^N [F_r(n) - \mu_r][F_v(n-k) - \mu_v]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [F_r(n) - \mu_r]^2 \sum_{n=1}^N [F_v(n-k) - \mu_v]^2}} \quad (3)$$

Yukarıdaki normalize çapraz korelasyon formülünde F_r ve F_v sırasıyla referans ENF ve video ENF sinyallerini, μ_r ve μ_v ise sırasıyla referans ENF sinyal ve video ENF sinyallerinin ortalama değerlerini temsil eder.

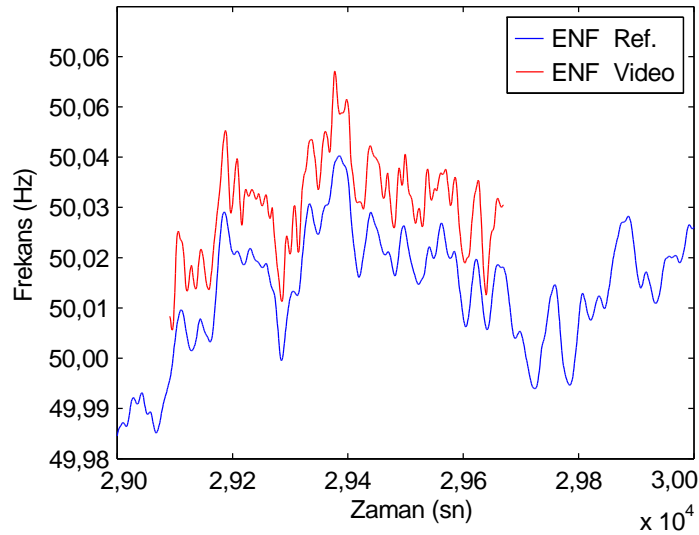
Referans ENF veri tabanının oluşturulabilmesi için Şekil 1'deki ENF adaptörü devresi kullanılmıştır (Vatansever ve Dirik, 2016). Bu devre, zayıflatılmış şebeke gerilimini (20mV dolayları) TRS (mikrofon) tipi konektörü vasıtasıyla PC ses kartına gönderir. PC'ye gelen bu sinyaller Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT-Short Time Fourier Transform) tabanlı frekans kestirim algoritması [9] ile işlenerek şebeke frekansının anlık değişimleri 1 örnek/saniye çözünürlükte hesaplanır ve kaydedilir.

Şekil 2'de spiral yoğun floresan tipi ampul ile aydınlatılmış bir ortamda çekilen 10 dakikalık bir duvar videosundan kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin normalize çapraz korelasyonu sonucu üretilmiş korelasyon katsayıları görülmektedir. Maksimum korelasyon katsayısı referans ENF sinyali kaydının başlatıldığı 29070. saniyede oluşmuştur. Bu noktanın video kaydının başlatıldığı ana karşılık geldiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla korelasyon işlemi sonucu videonun kayıt zamanı doğru bir şekilde bulunduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3'te,



Şekil 2:

10 dakikalık düz duvar videosundan (Video 1) kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin çapraz korelasyonu-Maksimum korelasyon katsayısı referans sinyalin 29070. saniyesinde bulunmuştur



Şekil 3:

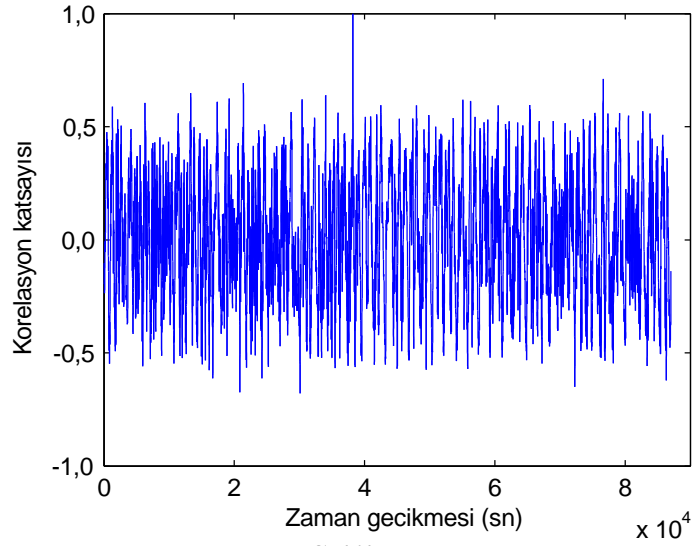
10 dakikalık düz duvar videosundan (Video 1) kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin korelasyon katsayısının en yüksek bulunduğu noktada (29070. saniye) üst üste çizdirilmesi

maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu noktada (29070. sn) üst üste çizdirilmiş video ENF sinyali ile referans ENF sinyali arasındaki yüksek benzerlik görülmektedir. 10 Hz dolaylarında bulunan video ENF sinyalinin referans ENF sinyali ile olan benzerliğini görsel olarak karşılaştırabilmek için dikey ekseninde 50 Hz bandına kaydırılmıştır.

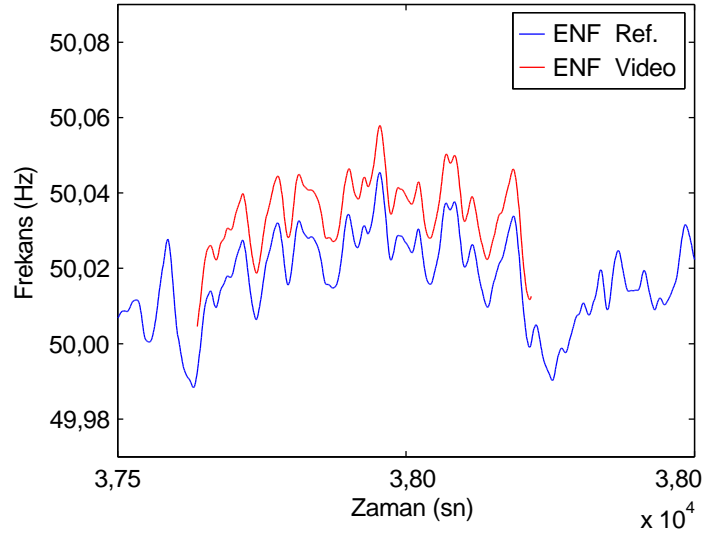
Şekil 4’de, araç içinden çekilmiş 10 dakikalık değişken içerikli bir videodan alınan örnek çerçeveler görülmektedir. Şekil 5’te, bu videodan kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin normalize çapraz korelasyonu sonucu üretilmiş korelasyon katsayıları görülmektedir. Maksimum korelasyon katsayısı referans ENF sinyali kaydının başlatıldığı 37617. saniyede oluşmuştur. Bu nokta video kaydının başlatıldığı zamana tekabül etmektedir. Dolayısıyla korelasyon işlemi sonucu videonun kayıt zamanının doğru bir şekilde tespit edildiği sonucuna varılır. Şekil 6’da, maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu noktada (37617. saniye) üst



Şekil 4:
İşlek bir caddede çekilen 10 dakikalık videodan (Video 2) 180 saniye aralıklarla alınan örnek çerçeveler



Şekil 5:
İşlek bir caddede çekilen 10 dakikalık videodan (Video 2) kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin çapraz korelasyonu-Maksimum korelasyon katsayısı referans sinyalin 37617. saniyesinde bulunmuştur



Şekil 6:
İşlek bir caddede çekilen 10 dakikalık videodan (Video 2) kestirilen ENF sinyali ile referans ENF sinyalinin korelasyon katsayısının en yüksek bulunduğu noktada (37617. saniye) üst üste çizdirilmesi



Şekil 7:

Karşılaştırılması yapılan ışık kaynağı türleri;

- a.** Akkor ampul (415 lümen, 2600 Kelvin) **b.** Halojen ampul (915 lümen, 2800 Kelvin)
c. Spiral yoğun floresan ampul (1450 lümen, 6500 Kelvin) **d.** LED ampul (700 lümen, 4000K)

üste çizdirilmiş video ENF sinyali ile referans ENF sinyali arasındaki yüksek benzerlik göze çarpmaktadır. Burada da 10 Hz dolaylarında bulunan video ENF sinyalinin referans ENF sinyali ile benzerliğini görsel olarak karşılaştırabilmek için dikey ekseninde 50 Hz dolaylarına kaydırılmıştır.

3. IŞIK KAYNAĞI TÜRÜNÜN VIDEO KAYNAKLI ENF KALİTESİNE ETKİSİ

Bu bölümde birbirinden farklı ışık kaynakları ile ayrı ayrı aydınlatılan bir ortamda sabit tutulmuş (hareketsiz) Canon PowerShot SX210 IS model CCD kamera ile 640x480 çözünürlükte çekilmiş düz duvar videolarının sırasıyla 2, 3, 5 ve 10'ar dakikalık kliplerinden ENF sinyalleri kestirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Işık kaynağı türünün videodan kestirilen ENF sinyali kalitesinde ne derece etkili olduğu incelenmiştir. Deneylerde kullanılan ışık kaynağı türleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

3.1. Binary Hipotez Testi

Çekilen videoların her birinin sırasıyla 2, 3, 5 ve 10'ar dakikalık kliplerinden elde edilen ENF sinyalleri, ait olduğu videonun çekildiği zaman dilimini kapsayan ve kapsamayan 24'er saatlik iki referans ENF sinyali ile ayrı ayrı normalize çapraz korelasyon işlemine sokulmuştur. Her iki durum için de maksimum korelasyon katsayılarının yeri ve değeri tespit edilmiş ve aşağıdaki kurallar doğrultusunda H_1 ve H_0 hipotezleri oluşturulmuştur:

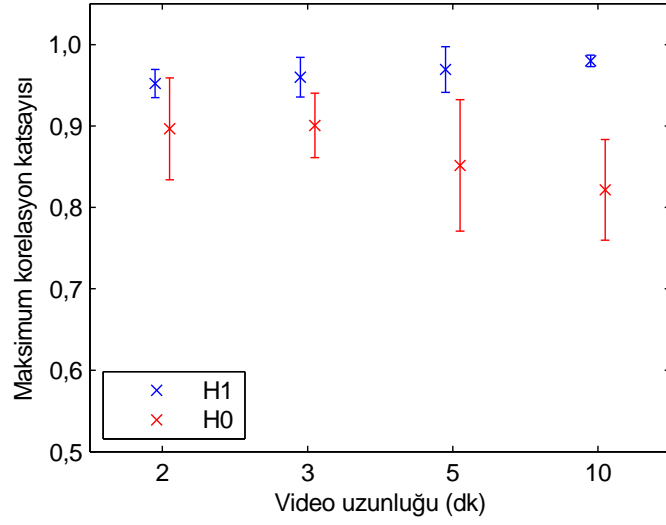
H_0 : Referans ENF ile video klibinden elde edilen ENF vektörünün maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu nokta video kaydının başlatılma anına tekabül etmiyor.

H_1 : Referans ENF ile video klibinden elde edilen ENF vektörünün maksimum korelasyon katsayısının bulunduğu nokta video kaydının başlatılma anına karşılık geliyor.

Eğer video ENF sinyalinin, video kayıt zamanını kapsayan referans ENF ile korelasyonu sonucu hesaplanan maksimum korelasyon katsayısı yanlış yerde bulunuyorsa, yani video kayıt zamanından farklı bir yerde hesaplanmışsa bu katsayı H_0 hipotezine dahil edilir. Şayet, video kayıt zamanını kapsayan referans ENF ile hesaplanan maksimum korelasyon katsayısı doğru yerde bulunduyorsa, yani videonun kayıt anını gösteriyorsa bu durumda maksimum korelasyon katsayısı H_1 hipotezine dahil edilir. Video kayıt zamanını kapsamayan referans ENF ile hesaplanan maksimum korelasyon katsayısı, video kayıt zamanını temsil etme ihtimali olmadığından doğrudan H_0 hipotezine dahil edilir.

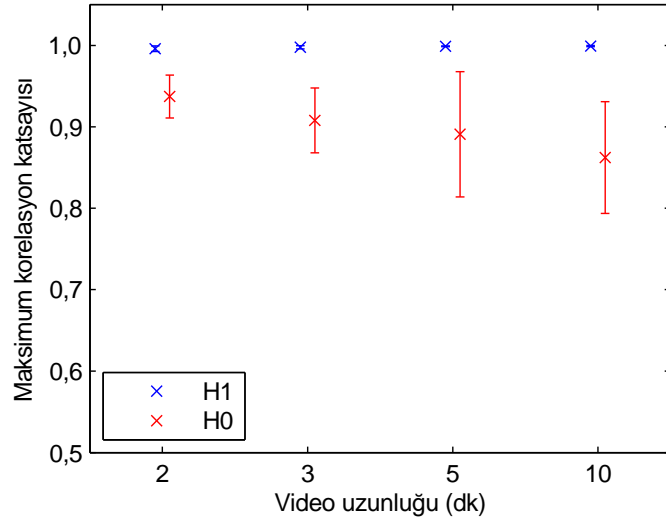
3.2. Deneysel Sonuçlar

Spiral yoğun floresan ampul ile aydınlatılmış bir ortamda, sabit tutulmuş Canon PowerShot SX210 IS model CCD kamera ile 640x480 çözünürlükte kaydedilmiş 6 adet düz duvar videosunun her birinin sırasıyla 2, 3, 5 ve 10 dakika uzunlukta birer klibinden ayrı ayrı ENF vektörü kestirilmiştir. Çıkartımı yapılan toplam 24 adet (6x4) ENF sinyalinin her biri sırasıyla ilgili videonun çekildiği zaman dilimini kapsayan ve kapsamayan 24'er saatlik referans ENF ile



Şekil 8:

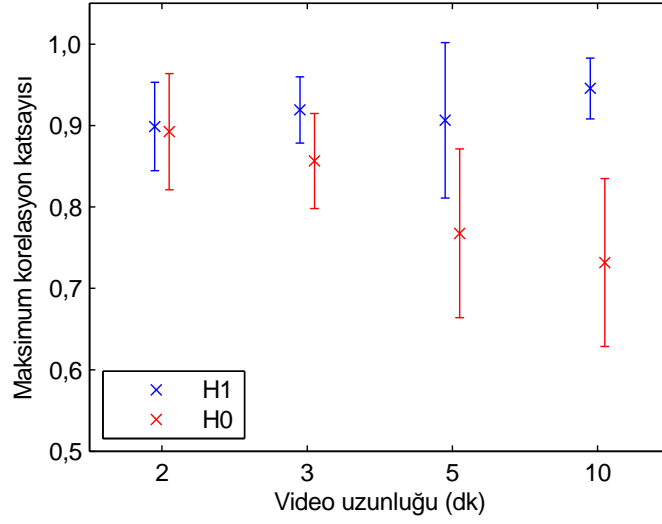
Spiral yoğun floresan ampul ile aydınlatılmış bir ortamda çekilmiş 6 ayrı videonun sırasıyla 2, 3, 5 ve 10 dakikalık kliplerinin ENF temelli kayıt zamanı tespiti için hesaplanmış H_1 ve H_0 'ların ortalama (orta nokta) ve standart sapma (en alt ve en üst noktalar) çubukları



Şekil 9:

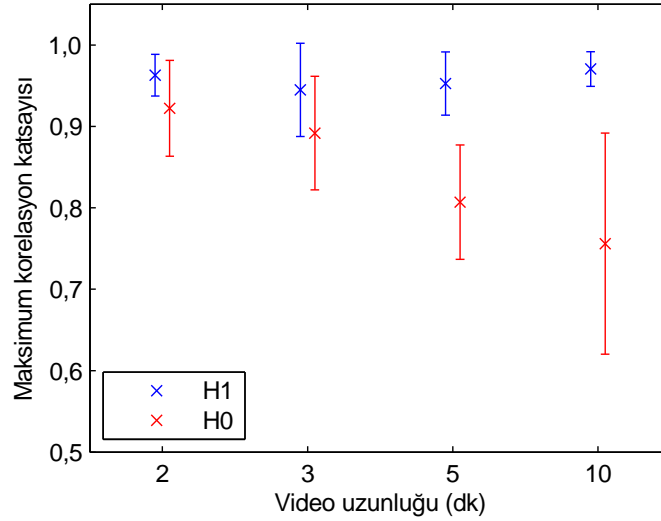
LED ampul ile aydınlatılmış bir ortamda çekilmiş 8 ayrı videonun sırasıyla 2, 3, 5 ve 10 dakikalık kliplerinin ENF temelli kayıt zamanı tespiti için hesaplanmış H_1 ve H_0 'ların ortalama (orta nokta) ve standart sapma (en alt ve en üst noktalar) çubukları

ayrı ayrı çapraz korelasyon sokulmuş ve maksimum korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan Maksimum korelasyon katsayılarının her biri videonun kayıt anı ile örtüşüp örtüşmemesine göre H_1 ya da H_0 hipotezlerine dahil edilir. H_0 ve H_1 hipotezleri, elde edildiği video klbinin süresine (10 dakikalık, 5 dakikalık, 3 dakikalık ya da 2 dakikalık) göre ayrı ayrı gruplandırılır. Şekil 8'de H_0 ve H_1 'lar kullanılarak her bir video klbi grubu için oluşturulmuş ortalama ve standart sapma çubukları görülmektedir. Çubukların orta noktası H_1 ya da H_0 'ların ortalama değerine, en üst ve en alt noktalar ise ortalama değerden 1 standart sapma ötesini ifade eder. Şekil 8'den görüleceği üzere spiral yoğun floresan ampul ile aydınlatılan bir ortamda çekilen 5 ve 10 dakikalık video klipleri için hesaplanan H_1 'ler ve H_0 'lar birbirlerinden ayırt edilebilecek uzaklıkta olmakla birlikte 2 ve 3 dakikalık videolar için tam olarak aynı şey söylenemez. Dolayısıyla bu ışık kaynağı türü altında çekilmiş 5 ve 10 dakikalık videolarda ENF



Şekil 10:

Akkor ampul ile aydınlatılmış bir ortamda çekilmiş 7 ayrı videonun sırasıyla 2, 3, 5 ve 10'ar dakikalık kliplerinin ENF temelli kayıt zamanı tespiti için hesaplanmış H_1 ve H_0 'ların ortalama (orta nokta) ve standart sapma (en alt ve en üst noktalar) çubukları



Şekil 11:

Halojen ampul ile aydınlatılmış bir ortamda çekilmiş 8 ayrı videonun sırasıyla 2, 3, 5 ve 10'ar dakikalık kliplerinin ENF temelli kayıt zamanı tespiti için hesaplanmış H_1 ve H_0 'ların ortalama (orta nokta) ve standart sapma (en alt ve en üst noktalar) çubukları

temelli kayıt zamanı tespit işleminin başarı oranı 5 dakikadan kısa süreli videolara göre daha yüksektir. Bahsi geçen deneylerin yapıldığı ortamdaki ışık kaynağı (Spiral yoğun floresan ampul) çıkartılıp yerine LED ampul takılmış ve bu ışık kaynağı altında yine sabitlenmiş Canon PowerShot SX210 IS model CCD kamera ile 640x480 çözünürlükte 8 adet düz duvar videosu çekilmiştir. Kaydedilen her bir videonun sırasıyla 2, 3, 5 ve 10 dakikalık klipleri için önerilen hipotez testine göre H_1 'ler ve H_0 'lar hesaplanmış ve ortalama ve standart sapma çubukları Şekil 9'daki gibi çizdirilmiştir. Görüleceği üzere, LED ışık altında çekilmiş çok kısa süreli videolarda bile H_1 'ler ve H_0 'lar birbirlerinden belirgin bir şekilde ayrılmıştır. Şekil 9'da H_1 'lerin her bir video süresi için 0.99 dolaylarında nokta şeklinde görünmesi hesaplanan tüm H_1 'lerin birbirlerine çok yakın olup standart sapmanın çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç

Tablo 1. Işık kaynağı türüne göre farklı uzunluktaki videolarda ENF temelli kayıt zamanı tespiti için oluşturulmuş ROC eğrisi altında kalan alanlar (AUC)

Işık Kaynağı Türü	AUC (Eğri altında kalan alan)			
	2 dakikalık video	3 dakikalık video	5 dakikalık video	10 dakikalık video
Spiral Yoğun Floresan (CFL)	0,8000	0,9167	0,9722	1,0000
LED	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Akkor	0,6000	0,8163	0,8776	1,0000
Halojen	0,7833	0,7500	0,9375	1,0000

olarak bu ışık kaynağı altında çekilmiş çok kısa süreli videolarda bile ENF temelli kayıt zamanı doğrulaması çok başarılı bir şekilde yapılabilmektedir.

Aynı ortam, LED ampul yerine sırasıyla akkor ampul ve halojen ampul kullanılarak aydınlatılmış ve aynı deney düzenekleri ile akkor ampul için 7, halojen ampul için 8 adet düz duvar videosu çekilmiştir. Önerilen hipotez testine göre, her bir videonun birer adet 2, 3, 5 ve 10 dakikalık klipleri için H_1 'ler ve H_0 'lar hesaplanmış ve ortalama ve standart sapma çubukları sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'deki gibi çizdirilmiştir. Ortalama ve standart sapma çubuklarından görüleceği üzere her iki ampul türü için de 2 ve 3 dakikalık videolarda H_1 'ler ve H_0 'lar iç içe girmiş durumda. 5 dakikalık video için halojen ampul daha iyi sonuç vermekte, 10 dakikalık videolar için ise her iki ampul türü için de performans yüksektir. Genel olarak akkor ampul ve halojen ampullerle aydınlatılan ortamda çekilen videolar için ENF temelli kayıt zamanı doğrulama performanslarının benzer nitelikte olması her iki ampul türünde de ısınan bir tungsten teli kullanılmasından kaynaklanıyor olabilir.

Işık kaynağı türlerine göre farklı uzunluktaki videolarda ENF temelli kayıt zamanı doğrulama işlemi performansını daha iyi kıyaslayabilmek için hesaplanan H_1 ve H_0 değerleriyle her bir ışık kaynağı ve video uzunluğu için ROC eğrisi oluşturulup altında kalan alan (AUC) hesaplanmış ve Tablo 1'de gösterilmiştir. ROC (Alıcı İşletim Karakteristiği-Receiver Operating Characteristic) eğrisi oluşturulurken 0 ile 1 arasında 1/1000 aralıklarla eşik değerleri seçilmiş ve seçilen her bir eşik değerine göre '*Doğru Pozitifler oranı*' ve '*Hatalı Pozitifler oranı*' hesaplanmıştır. '*Doğru Pozitifler oranı*'nın düşey eksenini '*Yanlış Pozitifler oranı*'nın yatay eksenini temsil edecek şekilde oluşturulan eğrilerin altında kalan alan 1'e ne kadar yakınsa yöntemin o kadar başarılı olduğu anlamına gelir. Tablo 1'den görüleceği üzere LED ampul ile aydınlatılan ortamda çekilen çok kısa süreli (2 dakika ve 3 dakika) videolarda bile AUC değerinin 1 çıkması bu ışık kaynağı türü altında çekilen videolarda ENF'ye dayalı kayıt zamanı doğrulama işleminin ne kadar başarılı bir şekilde yapılabileceğini ortaya koyar. Spirale yoğun floresan ampul altında kaydedilmiş kısa süreli videolar için hesaplanmış AUC değerleri LED ampul için hesaplananlar kadar yüksek olmasa da akkor ve halojen ampule göre kayda değer üstünlüğü vardır. Akkor ampul ve halojen ampuller için kısa süreli videolarda ENF tabanlı kayıt zamanı doğrulama işleminin güvenilir bir şekilde yapılabileceği söylenemez.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

CCD sensörlü kameralarla çekilmiş videolarda elektrik şebeke frekansı (ENF) temelli kayıt zamanı doğrulama işlemi performansı, videonun kaydedildiği ortamı aydınlatan ışık kaynağı çeşidine ve video uzunluğuna doğrudan bağlıdır. Videodan kestirilen ENF ile referans ENF'nin normalize çapraz korelasyonu sonucu hesaplanan maksimum korelasyon katsayısı, ortamı aydınlatan ışık kaynağı çeşidine göre farklılık göstereceği için tüm ışık kaynakları için ortak bir

eşik değeri belirlemek mümkün görünmemektedir. Türü fark etmeksizin elektrik şebekesine bağlı herhangi bir ışık kaynağıyla aydınlatılmış ortamda çekilen videoların kayıt zamanının doğrulanmasındaki başarı oranı, video uzunluğu kısaltıldıkça azalma eğilimindedir. Ancak LED ampul için durum farklı olup 2 dakika gibi çok kısa videolarda bile oldukça başarılı sonuçlara ulaşılabilmektedir. Akkor ampul ve halojen ampullerle aydınlatılan ortamda çekilen videolar için ENF temelli kayıt zamanı doğrulamada başarı oranlarının benzer nitelikte olması her iki ampul türünde de ısınan bir tungsten teli kullanılmasından kaynaklanıyor olabilir. Video uzunluğu arttıkça video dosyalarının ENF temelli adli kanıt analizi başarı performansında genel bir artış beklense de bütün video çerçeveleri boyunca değişmeyen ortak bir bölge bulmak gittikçe güçleşeceği için bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Diğer bir deyişle, videoda belirli bir süre boyunca içeriği sabit bir bölgenin sonraki sürelerde değişikliğe uğraması muhtemeldir. Dolayısıyla, bu tip bir video için tüm videodan ENF sinyali kestirmeye çalışmaktansa videonun belirli bir bölümüne odaklanmak, tüm video için mümkün olmayan ENF kestirimini böyle bir video klibi için mümkün kılabilir ve ENF temelli kayıt zamanı doğrulama işlemi bu video için gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Bollen, M. H., ve Gu, I. (2006) *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley.
2. Chai, J., Liu, F., Yuan, Z., Conners, R., ve Liu, Y. (2013) Source of ENF in Battery-Powered Digital Recordings, *Audio Engineering Society Convention* 135.
3. Cooper, A. (2008) The electric network frequency (ENF) as an aid to authenticating forensic digital audio recordings—an automated approach, *AES 33rd International Conference*, 1–10.
4. ENTSO-E. (2013) *European Network of Transmission System Operators for Electricity-Appendix 1 of System Operation Agreement* (Vol. 1).
5. Fechner, N., ve Kirchner, M. (2014) 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, 3–13. doi: 10.1109/IMF.2014.14
6. Garg, R., Varna, A. L., Hajj-Ahmad, A., ve Wu, M. (2013) “Seeing” ENF: Power-signature-based timestamp for digital multimedia via optical sensing and signal processing, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 8(9), 1417–1432. doi: 10.1109/TIFS.2013.2272217
7. Garg, R., Varna, A., ve Wu, M. (2011) Seeing ENF: natural time stamp for digital video via optical sensing and signal processing, *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimedia*, 23–32. doi: 10.1145/2072298.2072303
8. Grigoras, C. (2005) Digital audio recording analysis—the electric network frequency criterion, *International Journal of Speech Language and the Law*, 12(1), 63–76. doi: 10.1558/sll.2005.12.1.63
9. Grigoras, C. (2007) Applications of ENF criterion in forensic audio, video, computer and telecommunication analysis, *Forensic Science International*, 167(2-3), 136–145. doi: 10.1016/j.forsciint.2006.06.033
10. Proakis, J. G., ve Manolakis, D. G. (2007) *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, And Applications*, 4/E. Pearson Education.

11. Sidhu, T. S. (1999) Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(1), 75–81. doi: 10.1109/19.755064
12. Vatansever, S. ve Dirik, A E. (2016) Forensic Analysis of Digital Audio Recordings Based on Acoustic Mains Hum, *24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 1285–88. doi: 10.1109/SIU.2016.7495982