



## Enhanced spectral decomposition method for light flicker evaluation of incandescent lamps caused by electric arc furnaces

Sıtkı Akkaya<sup>1\*</sup>, Özgül Salor Durna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Bozok University, 66200 Yozgat, Turkey

<sup>2</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570 Maltepe Ankara, Turkey

### Highlights:

- Short time flicker severity Pst & flicker sensation Smax
- Spectral decomposition method
- Fundamental frequency deviation on power system

### Keywords:

- Flicker detection
- Frequency deviation
- Spectral correction
- Spectral decomposition
- Light flicker

### Article Info:

Research Article  
Received: 15.08.2017  
Accepted: 23.05.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.460497

### Acknowledgement:

The field data used in this article were obtained within the scope of Power Quality National Project. The authors would like to thank the TUBITAK-KAMAG group.

### Correspondence:

Author: Sıtkı Akkaya  
e-mail:  
sitki.akkaya@bozok.edu.tr  
phone: +90 354 242 1001  
/1737

### Graphical/Tabular Abstract

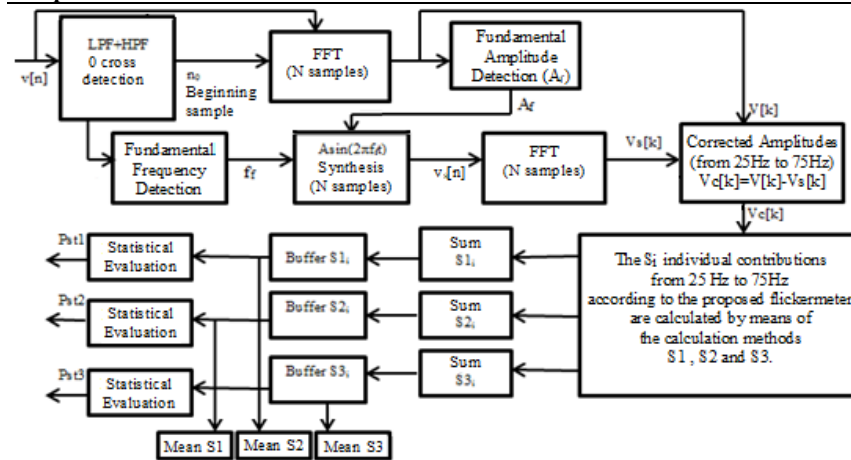


Figure A. Block Diagram of the Proposed Enhanced Flickermeter Method Based on Spectral Correction & FFT

### Purpose:

Multiple interharmonic resources as electric arc furnaces, photocopy machines and x-ray devices lead to the voltage fluctuations in the electricity power systems. Therefore, light flicker seen also by end-users occurs in lamps. IEC 61000-4-15 standard proposes a flickermeter measuring the light flicker values. But it is known that this flickermeter measures erroneous when fundamental frequency deviates. So, this method is designed to provide the best possible estimations of the maximum instantaneous flicker sensation value from the voltage fluctuations in the electricity power systems in cases of fundamental frequency deviations.

### Theory and Methods:

This method uses the FFT, fundamental frequency detection, spectral decomposition & correction method. The proposed method calculates the instantaneous flicker value directly from the frequency spectrum of the voltage signal unlike the standard IEC 61000-4-15 flickermeter. The proposed method uses all the flicker frequency components existing in the 0-25 Hz band to compute the corresponding flicker effect and sums them up to determine the overall flicker severity. This flicker frequency range is adjusted to analyze the voltage fluctuations caused by electric arc furnaces, wind turbines and solar cells in the power system. Besides, owing to spectral corrections, this can also obtain the correct flicker value when the fundamental frequency deviates.

### Results:

This method is compatible with IEC flickermeter and although the fundamental frequency deviates with  $\pm 0.5$ Hz, this method calculates the flicker values with maximum %1 error which is negligible. Also when it is compared with other flicker detection method based on FFT, it has been seen that proposed method has somewhat higher performance than it.

### Conclusion:

This method has been performed by synthetically and by field data and shown that it is in consistence with IEC flickermeter and robust to fundamental frequency deviation unlike IEC flickermeter. Also it has been seen that the proposed flickermeter measures the flicker values rapidly and precisely.



## Elektrik ark ocaklarının akkor flamanlı lambalarda oluşturduğu ışık kırışmasının değerlendirilmesi için iyileştirilmiş spektral ayrıştırma yöntemi

Sıtkı Akkaya<sup>1\*</sup>, Özgül Salor Durna<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 66200, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Maltepe, Ankara, 06570, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kısa dönem kırışma şiddeti Pst ve kırışma hassasiyeti Smax
- Spektral ayrıştırma yöntemi
- Güç sisteminde temel frekans sapsması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.08.2017

Kabul: 23.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460497

### Anahtar Kelimeler:

Kırışma sezme,  
temel frekans sapsması,  
spektral düzeltme,  
spektral ayrıştırma,  
ışık kırışması

### ÖZET

Bu makalede, çoklu kırışma kaynaklarından ortaya çıkan ve güç sistemleri için güç kalitesini önemli ölçüde bozucu etkiye sahip olan ışık kırışmasının seziilmesi için geliştirilmiş bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, temel frekansın sapsması durumunda hatalı sonuçlar verdiği bilinen standart IEC 61000-4-15 kırışma ölçerinden farklı olarak, gerilim sinyalinin frekans spektrumundan doğrudan anlık kırışma değerini hesaplamakta ve yapılan spektral düzeltmelerle, temel frekansın saptığı durumlarda da doğru kırışma değerini elde edebilmektedir. Sentetik sinyallerle yapılan testler, farklı araharmonik frekans değerlerinin tek başına varlığında, çoklu frekans bileşenlerinin bulunduğu durumlarda ve temel frekans sapsması durumları için oluşturulmuş ve önerilen yöntemin hesapladığı anlık kırışma değerleri, IEC kırışma ölçerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yöntem, Türkiye Elektrik İletim Sistemi'nde elektrik ark ocaklarını besleyen bir baradan alınmış gerilim verisinin kırışmasının hesaplanması için de kullanılmış ve IEC kırışma ölçerinin sonuçları ile karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Yöntemin avantajı, birçok güç kalitesi çözümleyicide zaten hesaplanmakta olan Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) örnekleri üzerinde yapılan aritmetik işlemlere indirgendiği için kırışma tahminini hızlı ve hassas bir şekilde yapabilmesidir.

## Enhanced spectral decomposition method for light flicker evaluation of incandescent lamps caused by electric arc furnaces

### H I G H L I G H T S

- Short time flicker severity Pst & flicker sensation Smax
- Spectral decomposition method
- Fundamental frequency deviation on power system

### Article Info

Research Article

Received: 15.08.2017

Accepted: 23.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460497

### Keywords:

Flicker detection,  
frequency deviation,  
spectral correction,  
spectral decomposition,  
light flicker

### ABSTRACT

In this paper, an improved method for detecting light-flicker from multiple flicker sources which has a significant detrimental effect on power quality for power systems is proposed. The proposed method calculates the instantaneous flicker value directly from the frequency spectrum of the voltage signal unlike the standard IEC-61000-4-15 flickermeter known to give erroneous results in case of deviation of the fundamental frequency. Besides, owing to spectral corrections, this can also obtain the correct flicker value when the fundamental frequency deviates. Tests with synthetic signals have been generated in the presence of a single interharmonic frequency for different values, multiple frequency components and fundamental frequency deviations respectively, and then the instantaneous flicker values calculated by this method have been compared with IEC-flickermeter results. The method has been also used to calculate the flicker of field data obtained from busbars feeding electric arc furnace plants in the Electricity Transmission System of Turkey and the flicker-severity results have been compared with the results of the IEC-flickermeter. The advantage of the method is that it can swiftly and precisely estimate the flicker because of the reduction of it to arithmetic operations on Fast Fourier Transform(FFT) samples already calculated in many power quality analyzers.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: sitki.akkaya@bozok.edu.tr, salordurna@gazi.edu.tr / Tel: +90 354 242 1001/1737

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük genlikli gerilim dalgalanmalarının sıklıkla tekrarlanmasıyla oluşan ışık kırışmaları güç sistemlerinde önemli güç kalitesi bozunumlarından biridir. Gerilimin genliğindeki oynamanın belli frekans aralığındaki değerleri, akkor flamanlı lambalarda aydınlanmanın dalgalanmasına neden olur ki buna ışık kırışması adı verilir ve bu durum insanlarda rahatsız edici bir etki oluşturur. Bu tip dalgalanmalar, ark ocakları gibi orta ve yüksek gerilimden beslenen değişken yüklerden veya X-ray ve fotokopi makinası gibi düşük gerilime bağlı değişken yüklerden de kaynaklanabilir. Bu nedenle hızlı değişen yüklerle oluşan gerilim dalgalanmaları hissedilebilir ışık kırışmasına neden olabilirler. Yapılan çalışmalarda; 50 Hz'in altındaki özellikle de 0,5 Hz ve 25 Hz arasındaki gerilim dalgalanmalarının, akkor flamanlı lambanın aydınlanmasına maruz kalan insanlarda sinir bozucu etkiye sahip olduğu gösterilmiştir [1]. IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyon), akkor flamanlı lambanın neden olduğu ışık dalgalanmalarından ışık kırışması ölçümünü, gerilimi giriş olarak alan ve lamba göz beyni benzeten bir ağırlıklandırma eğrisi kullanan bir yapı ile IEC 61000-4-15 adıyla standartlaştırmıştır [1].

Bu standartta lamba göz beyin benzetimi yapılarak ışık kırışmasının insan üzerindeki etkisinin doğrudan lambayı besleyen gerilimden ölçülmesi önerilmektedir. Bu yapıda en çok kullanılan terimler; anlık kırışma ölçümü olan  $P_{inst}$  (Anlık kırışma hassasiyeti ve  $S$  olarak da ifade edilmektedir) ve 10 dakikalık ölçümden elde edilen  $P_{st}$  (Kısa Dönem Kırışma Şiddeti) dir. Standartta göre doğru ölçüm yapan bir kırışmaölçer, verilen belli test gerilim sinyalleri için, bu değerleri  $S_{max} = 1 \pm 0,08$  ve  $P_{st} = 1 \pm 0,05$  aralığında bulmalıdır. Özellikle anlık kırışma ölçümü olan  $S$  değeri,  $P_{st}$  de ondan elde edildiği için, hesaplamalar açısından çok önemlidir.

IEC 61000-4-15 standardına göre kırışmaya sahip olan bir işaret; genlik modülasyonu modeli ile Eş. 1'deki gibi gösterilmektedir.

$$v(t) = V \sin(2\pi ft) \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta V}{V} \sin(2\pi f_B t + \phi) \right\} \quad (1)$$

**Tablo 1.** 230 V/50 Hz lik sistem için IEC 61000-4-15 kırışmaölçer standardına göre anlık kırışma hassasiyet değeri  $S_{max}=1$  değerini veren  $\Delta V/V$  (oransal kırışma genliği) değerleri tablosu (Table of  $\Delta V/V$  (relative flicker amplitude) values for 230 V/50 Hz system gives maximum instantaneous flicker sensation=1 according to IEC 61000-4-15 flickermeter standard.)

Hz	% $\Delta V/V$	Hz	% $\Delta V/V$	Hz	% $\Delta V/V$	Hz	% $\Delta V/V$
0,5	2,325	5,5	0,357	11	0,283	20	0,704
1	1,397	6	0,325	11,5	0,298	21	0,764
1,5	1,067	6,5	0,300	12	0,314	22	0,828
2	0,879	7	0,280	13	0,351	23	0,894
2,5	0,747	7,5	0,265	14	0,393	24	0,964
3	0,645	8	0,256	15	0,438	25	1,037
3,5	0,564	8,8	0,250	16	0,486		
4	0,497	9,5	0,254	17	0,537		
4,5	0,442	10	0,261	18	0,590		
5	0,396	10,5	0,271	19	0,646		

Burada  $V$  temel harmoniğin genliği,  $\Delta V/V$  kırışmaya neden olan araharmoniğin oransal genliği,  $f$  temel harmonik frekansı,  $f_B$  kırışmaya neden olan genlik dalgalanmasının frekansı,  $\phi$  ise bu frekansa ait fazdır. Görüldüğü gibi, ışık kırışmasına sahip olan bir işaret, temel anlamda bir genlik modülasyonu ile modellenilebilir. Eş. 1'deki sinüs çarpımı için trigonometrik açılım yapıldığında,  $f \pm f_B$  frekanslarında araharmonikler oluştuğu görülür. Tablo 1'de 50 Hz'lik bir temel harmoniğin sahip olduğu kırışma frekansından  $S_{max} = 1$  bulunması için olması gereken oransal genlik değerleri verilmektedir [1]. IEC Standardı bu tabloyu, geliştirilen bir kırışmaölçerinin doğruluğunu test etmek için vermiştir.

IEC kırışmaölçer yönteminde temel frekansın sürekli sabit kaldığı ve Eş. 1'de olduğu gibi kırışmaya neden olan tek bir frekansta salınımın var olduğu kabul edilmiştir ve bu salınım gerilimde temel frekansın etrafında simetrik dağılımlı araharmoniklere neden olmaktadır. Ancak durum pratikte böyle değildir. Bu farklılığın üstesinden gelmek için çeşitli yöntemler önerilmiştir: Grey'in çalışmasında teoriyle birleştirilmiş bir radyal tabanlı sinir ağı (RBFNN) kullanılarak farklı sinir ağı yöntemlerine göre daha iyi kırışma şiddeti hesapladığı görülmüştür [2]. [3]'te, farklı ağ topolojisine ve farklı kırışma kaynaklarındaki kırışma seviyelerini hesaplamak için; farklı kırışma toplam katsayıları karşılaştırılıp bir tanesinin en küçük hatayı verdiği tespit edilmiştir. Yöntemin tüm ağ noktalarında iletim sistem operatörlerine kırışma seviyelerini sürekli değerlendirme imkânı verdiği gözlenmiştir [4]'te, IEC 61000-4-15 ile yapılan hesaplamaların karekök ortalama kare (rms) ile elde edilebileceği gösterilmiştir. Alt bir transformatör merkezinden beslenen çoklu ark ocaklarına sahip bir sistemin oluşturduğu kırışmayı etkili bir şekilde tahmin edebilecek yeni bir model, [6]'da MATLAB ortamında geliştirilmiştir. Başka bir çalışmada, gerilim kırışma ölçümünün değerlendirilmesi için sürekli dalgacık dönüşüm yöntemi de uygulanmıştır [7]. Kırışmaölçerinin donanımsal uygulaması yapılan bir çalışmada ise kırışmanın, işarette oluşturduğu aydınlanma değişiminin değerlendirilmesinden elde edilebileceği gösterilmiştir [8].

Benzer şekilde kırışmanın yüksek hızlı görüntüleme yapabilen kameralar kullanılarak aydınlanmadaki değişimden elde edilebileceği de gösterilmiştir [9]. Ayrıca sadece rüzgâr enerjisi santralleri ve güneş enerjisi santralleri için önemli bir güç kalite bozunumu olan kırışma için yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Rüzgâr enerjisi santrallerindeki kırışmayı sezmeye yönelik çalışmalar rüzgâr enerjisi için ayrıca önerilen IEC 61400-21 standardını kullanmaktadır [12]. [10, 11] arasındaki çalışmalar bu kapsamdadır. Güneş enerjisi santrallerindeki gerilim kırışmasının değerlendirilmesi için yapılan çalışmalarda ise [13]'teki IEC 61000-3-3 standardı kullanılmıştır [14, 15]. Ancak rüzgâr enerjisi santrallerindeki gerilim kırışmasını değerlendirmeye yönelik bazı çalışmalar IEC 61000-4-15 standardı yardımıyla kırışmanın değerlendirilebileceğini göstermiştir [16-18]. Aynı zamanda güneş enerjisi santrallerinde de IEC 61000-4-15 standardı kullanılarak kırışmanın değerlendirilebileceği görülmüştür [19-21].

Bazı çalışmalarda, araharmonik genlikleri yardımıyla, her bir araharmonik bileşenin kırışmaya olan katkısı göz önünde bulundurularak kırışma hassasiyeti elde edilmeye çalışılmıştır. Burada kırışmaya sahip olan bir işaretin Eş. 1'den farklı olarak toplanabilir bir şekilde birden fazla kırışma bileşeninden oluştuğu Eş. 2 ile gösterilmiştir [22].

$$v(t) = V \sin(2\pi f t) \{1 + \sum_{i=1}^N 1/2 \Delta V_i/V \sin(2\pi f_{B_i} t + \phi_i)\} \quad (2)$$

Eş. 2'de  $f$ , temel frekansı,  $\Delta V_i/V$ , kırışma bileşenlerinin genliğini  $f_{B_i}$ , kırışma bileşenlerinin frekansını ve  $\phi_i$  kırışma bileşenlerinin fazını belirtmektedir.

Bu modele uygun olarak yapılan başka bir çalışmada her bir çevrimin zarfını elde etmek için rms'i alınmış ve daha sonra FFT yardımıyla kırışma bileşenleri elde edilmeye çalışılmıştır. Ancak bu yöntemin saha verisi için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır [23]. Anlık gerilim vektörleri kullanılarak yapılan bir çalışmada ise gerilim kırışma bileşenleri hesaplanmaya çalışılmış, sistem frekansı ve genliği gerilim dalga şeklinin fazından elde edilmiştir [24].

Sahada temel frekans  $\pm 0,20\text{Hz}$  aralığında değişim gösterebilmektedir [25]. Bu değişim çok küçük aralıklarda olduğundan ölçümlerin de bu küçük aralıklar için doğru bir şekilde alınması gereklidir. IEC 61000-4-7 standardı bunu 200 ms'nin uzunluğunda pencereler şeklinde alınmasını önermiştir [26]. Eş. 2'ye uygun şekilde araharmonik bileşenlerinin kırışmaya katkısının, sistem frekansı kaydedildiğinde, IEC 61000-4-7 standardına göre 200 ms'lik pencereler halinde değerlendirilerek hesaplanması iyi bir çözüm olabilmektedir [25]. Bu yöntemle, anlık kırışma değeri olan  $S$ 'nin Eş. 3 ve Eş. 4 yardımıyla elde edilebileceği gösterilmiştir.

$$S_i \approx \frac{(\Delta V_i/V)^2}{(\Delta V_i/V)^2_{IEC}} \quad (3)$$

$$S \approx \sum_{i=1}^N S_i \quad (4)$$

[25]'te, saha verisinde frekans kaymasından kaynaklanan spektral sızıntının önüne geçebilmek için, temel frekanstaki bileşenden kaynaklanan sızıntıyı bulup orijinal sinyalin Ayırık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform-DFT)'sinden çıkartan bir yaklaşım kullanılmıştır. İşlemler 0,2sn uzunluğunda pencerelerle ve 0,02sn örtüşme ile tekrarlanmış ve kırışma bileşenlerinden olan temel harmonik etrafındaki  $f \pm 25\text{Hz}$  (25Hz-75Hz) aralığındaki tüm araharmonikler kullanılarak,  $S$  değeri Eş. 3 ve Eş. 4 kullanılarak elde edilmiştir.

Ancak bu çalışmada [28]'de de görüldüğü gibi şebekedeki DC varlığı da göz önüne alınarak YGF (Yüksek geçiren filtre) de olması gerekmektedir. [28]'de ayrıca temel frekansın kaymasının dışında oluşabilecek sızıntılar dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, spektral düzeltmenin yapıldığı ve böylelikle  $S$  ile  $P_{st}$  değerlerinin elde edildiği bloktaki hesaplamaların daha hassas yapılması, temel frekansın etrafında oluşan ( $50 \pm 25\text{Hz}$ : 25-75 Hz) bileşenlerden araharmonik değerlerinin iyi bir şekilde hesaplanmasını sağlayarak kırışma kestirim başarımını arttıracaktır.

Bu çalışmada, hem DC bileşenin etkilerini süzerek hem de frekans sapsmasının üstesinden gelerek simetrik modelden daha gerçekçi bir model üzerinde araharmonik değerinin doğru bir şekilde hesaplanması için yapılan işlemler anlatılmıştır. Böylelikle  $S$ 'nin belli bir zaman aralığında en yüksek değeri olan  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  değerlerinin önceki çalışmalara göre ([25, 28]) daha doğru bir şekilde elde edilmesi sağlanmıştır. Yöntem hem sentetik veriler üzerinde, hem de saha verileri üzerinde uygulanmış ve IEC kırışmaölçeri ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

## 2. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Önerilen yöntemde, 25Hz kesim frekansında bir YGF ve ardından AGF ilk işlem olarak uygulanmaktadır. Bu filtreleme ile birlikte, sinyalin sıfır geçiş noktalarının hassas bir şekilde belirlenmesiyle,  $S$ 'nin doğru hesaplanması için çok önemli olan FFT başlangıç noktaları ( $n_0$ ) tespit edilmektedir. FFT başlangıç noktaları, sıfır geçiş noktaları olarak belirlenmiştir. Böylece, her bir pencere için temel frekansın genliği ve frekansı daha doğru bir şekilde belirlenecektir. Bunların belirlenmesinden sonra  $S$  ve  $P_{st}$  hesaplaması gerçekleştirilir.

### 2.1. Önerilen Yaklaşım İle İlgili Ayrıntılar (Details of the Proposed Approach)

Önerilen yöntemin geliştirilmesinde yapılan varsayımlar, bir önceki bölümde verilen bilgilerin ışığında şöyle sıralanabilir:

- IEC 61000-4-15 standardına göre ışık kırışmasına sebep olan gerilim Eş. 1'deki gibi bir genlik modülasyonu şeklinde modellenmiş ve daha karmaşık genlik bozulmaları ise Eş. 2'deki gibi çoklu modülasyon olarak tanımlanmıştır ve bütün yöntem bunun üzerine inşa edilmiştir.

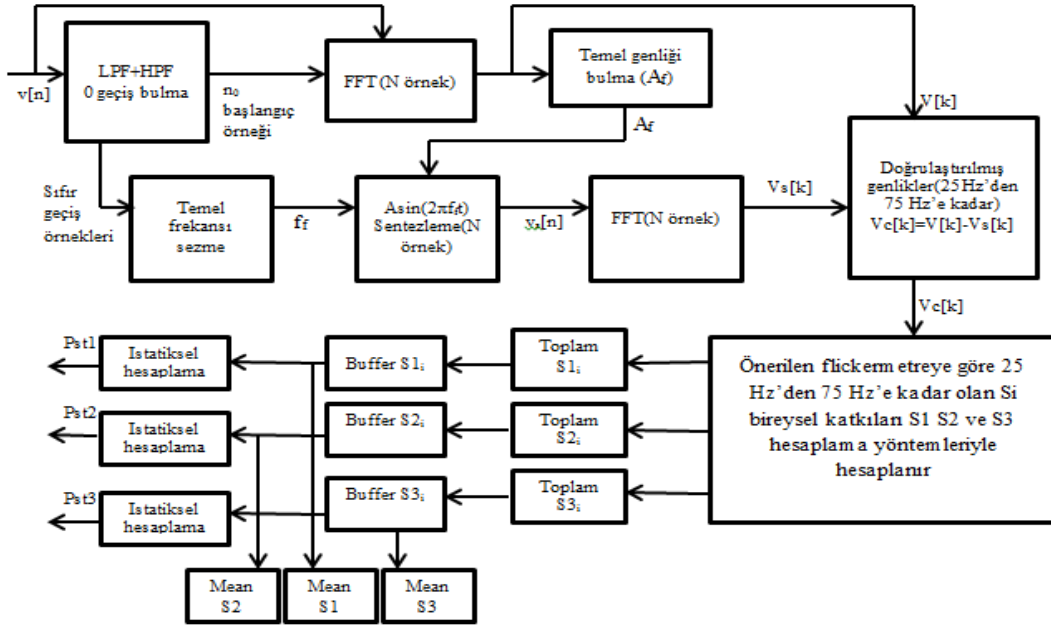
- Gerilim kırışmasına neden olan frekans aralığı Tablo 1’de görüldüğü gibi, IEC kırışma ölçer standardında 0-25 Hz frekans aralığı olarak tanımlanmıştır. IEC standardı, 50 Hz temel frekanslı sistemler için, 33,3Hz’de tablodaki değerlere göre çok yüksek bir gerilim değeri olan % 2,130 V’u da test değerleri için tanımlamış olup, bu frekanstaki bir dalgalanmanın etkisinin çok düşük olacağı varsayımı ile bu değer ihmal edilmiş ve bütün hesaplamalar 0-25 Hz aralığındaki kırışma frekansı için yapılmıştır. Genlik modülasyonu, açılarak yazıldığında bu aralık,  $f$  temel frekans olmak üzere,  $f \pm 25$  Hz olan 25 – 75 Hz aralığındaki araharmoniklere denk gelmektedir.
- Önerilen yöntem DFT örneklerini kullanarak işlem yaptığı için IEC kırışma ölçeri gibi sürekli bir anlık kırışma değeri sağlamamakta, ancak her 0,2 sn’lik pencere için bir anlık kırışma değeri sağlamaktadır. Bu durumda zaman hassasiyetini arttırmak için, önerilen yöntemde 0,02 sn’de kayan 0,2 sn uzunluğunda pencereler kullanılmış (yani temel frekansın 9 çevriminde örtüşen pencereler) ve IEC kırışma ölçerinin saniyede 50 anlık kırışma ölçer değeri gereksinimi karşılanmıştır. Bu değerler üzerinden yapılan hesaplamaların ileriki bölümlerde gösterileceği gibi yüksek doğrulukta anlık kırışma değerleri sağladığı görülmüştür.
- Önerilen yöntemle bulunan anlık kırışma değerleri, IEC kırışma ölçeri ile karşılaştırılırken, IEC kırışma ölçerinin o pencere içindeki maksimum anlık kırışma değerleri ile karşılaştırılma yapılmıştır.

Önerilen yaklaşımın akış şeması Şekil 1’de görülmektedir. Burada 9 çevrim örtüşen (overlapping) 10 çevrim uzunluğunda (yaklaşık 0,2sn) pencerelerle alınan gerilim verisi üzerinde işlem yapılmıştır. 3200 Hz ile örneklenmiş 10 dakika uzunluğunda sentetik ve saha verisi ile çalışılmıştır. Makalede kullanılan saha verisi, Türkiye Elektrik İletim

Sistemi’nden Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında üretilen PQ<sup>+</sup> güç kalitesi çözümleyicileri ile İskenderun Bölgesi’nde elektrik ark ocağı bulunan bir fabrikayı besleyen transformatör merkezinden alınmış 10 dakikalık veridir. Bu veri alınırken fabrikanın elektrik ark ocağı aktif durumda ve ilk şarj durumundadır. Trafonun orta gerilim kısmında alınmıştır [29]. Hesaplamalar yapılırken, 0,2 sn (50,0Hz için tam 10 çevrim) uzunluğunda ve 0,18sn örtüşmeli (overlapping) pencereler kullanılmıştır. Saha verisi elektrik iletim sisteminin ark ocaklarını besleyen bir ortak bağlantı noktasından alınan gerilimden oluşmuştur. Şekil 1’de  $V_c[k]=V[k]-V_s[k]$  işlemi yapılan spektral düzeltmeyi anlatmaktadır.  $k$  indisi 5 Hz çözünürlükteki spektral indistir. Görüldüğü gibi örneklenmiş  $v[n]$  gerilimi her bir 0,2 sn aralığı için alınmış; bir AGF (alçak geçiren süzgeç) ve YGF (yüksek geçiren süzgeç) ile süzülerek 75 Hz’den daha büyük bileşenlerin süzülmesi amaçlanmıştır. Bu blokta “sıfır (0) geçiş sezme” uygulanmış ve FFT işlemi için  $n_0$  başlangıç değeri ve sıfır geçiş örnekleri yardımıyla temel frekans değeri olan  $f_f$  elde edilmiştir. FFT örneklerinden temel harmonik genliği olan  $A_f$  elde edilmiş ve spektral düzeltmeyi sağlayacak olan  $V_s[k]$  hesaplaması yapılmıştır.  $V_s[k]$ , bulunan  $A_f$  ve  $f_f$  kullanılarak oluşturulmuş ve  $n_0$  noktasından sıfır geçişi yapan sinüs dalgasından elde edilen FFT’dir. Bu FFT  $V_s[k]$  için 0,2sn uzunluğunda pencereden hesaplandığından ve  $f_f$  her zaman 50,0Hz olamayacağından,  $f_f$  frekansındaki temel frekans bileşeninden kaynaklanan spektral kaçığı içinde bulunduracaktır.  $V_c[k]=V[k]-V_s[k]$  ifadesi ile bu kaçık etki giderilmekte ve daha sonra düzeltilmiş spektrumdan  $S$  ile  $P_{st}$  değerleri elde edilmektedir.

Aşağıda bu basamaklar sıralanmıştır:

- 0,2 sn genişliğinde alınan veriden dolayı kırışma hesaplamasını etkileyebilecek büyüklükte olabilen DC



Şekil 1. Önerilen Yöntemin Blok Şeması (Block Diagram of the Proposed Method)

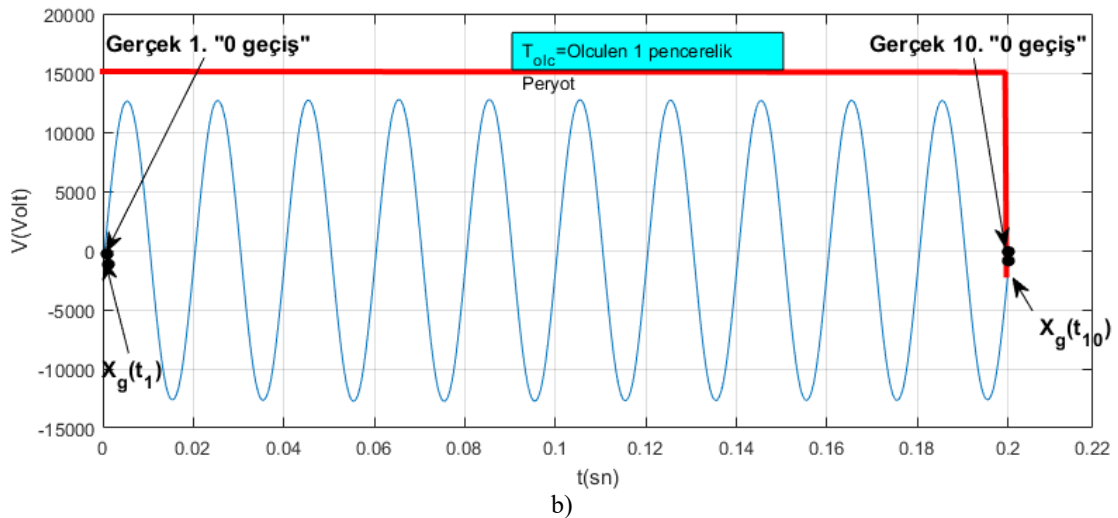
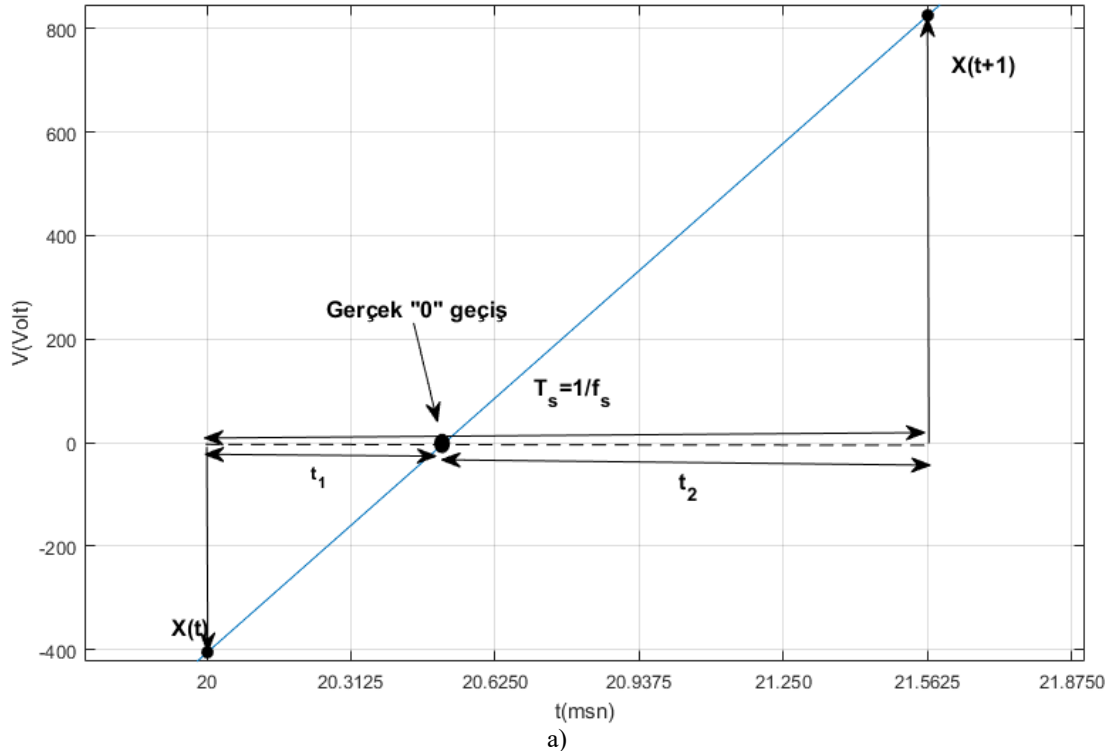
bileşeni engellemek için AGF (75Hz) ve YGF (25 Hz) kullanılarak DC ve yüksek frekans bileşenlerin kırışma etkisi engellenmektedir.

- Sıfır geçişleri bulunurken ([27]'de kullanılan yöntem) Şekil 2'deki örneğe benzer şekilde düzeltme uygulanmıştır. Böylece temel frekans hesabı çok daha hassas ve doğru yapılmaktadır. Frekansın doğru hesaplanması,  $S$  ve  $P_{st}$  hesapları için büyük önem taşımaktadır.

Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi sıfır geçiş bulunurken; sinyalin örnekleme zaman aralığında lineer geçiş yaptığı varsayılarak

basit üçgende benzerlik kuralı uygulanmış, "AGF+YGF" den geçirilerek diğer bileşenlerden arındırılmış ve işaret sıfırdan geçerken bu işaretin sıfıra en yakın olan örneğinin değeri alınmıştır. Şekilden de görüleceği gibi sıfırdan küçük ilk değeri  $x(t)$  iken, bu noktanın gerçek sıfır geçişine kadar olan zaman aralığı  $t_1$ , sıfırdan büyük ilk değeri  $x(t+1)$  iken de bu değerlerin gerçek sıfır geçişine kadar olan zaman aralığı  $t_2$  olarak adlandırılmıştır.  $x(t+1)$  ve  $x(t)$  örnekleri arasındaki süre; örnekleme frekansı  $f_s$  olmak üzere örnekleme periyodu olan  $T_s=(1/f_s)$ 'dir.

Burada her pencere için ilk sıfır geçiş noktası Eş. 5, Eş. 6, Eş. 7 ve Eş. 8 ile belirlenir:



**Şekil 2.** Sıfır (0) Geçiş Yönteminin uygulanışı. a) Sıfır Geçiş Yöntemiyle tek "0" noktasının belirlenmesi. b) Sıfır Geçiş Yöntemiyle 10 çevrimde sıfır geçiş noktalarının belirlenmesi. (Application of the zero-crossing detection method. a) determination of the zero-crossing point of a single point, b) determination of zero-crossing points of the 10-cycle window)

$$t_2 = \frac{1}{f_s} - t_1 \quad (5)$$

$$oran = \left| \frac{x(t+1)}{x(t)} \right| \quad (6)$$

$$\frac{x(t+1)}{x(t)} = \frac{\frac{1}{f_s} - t_1}{t_1} \quad (7)$$

$$t_1 = \frac{1/f_s}{oran+1} \quad (8)$$

Son sıfır geçiş noktası da benzer şekilde Eş. 9 Eş. 10 ve Eş. 11 ile bulunur:

$$oran_{son} = \left| \frac{x(t_{son}+1)}{x(t_{son})} \right| \quad (9)$$

$$t_{end1} = \frac{1/f_s}{oran_{son}+1} \quad (10)$$

$$t_{end2} = \frac{1}{f_s} - t_{end1} \quad (11)$$

Eş. 5 ile Eş. 9'a kadar yapılan hesaplamalar, temel frekans hesabındaki 10 çevrimlik sürenin hassas şekilde hesaplanmasını sağlamakla birlikte, FFT alınırken kullanılacak pencerenin başlangıç noktası olan  $n_0$  mecburen örnek noktalarından biri olarak seçilmelidir.  $t_1$  ve  $t_2$  zaman aralığından hangisi küçükse ona yakın olan örnek noktası  $n_0$  olarak belirlenir. Bu nedenle ilk sıfır geçişi ve son sıfır geçiş noktası ise 10. çevrim geçişi olan Şekil 2(b)'deki  $x_g(t_{10})$  olarak belirlenir ve temel frekans,  $f_f$  Eş. 12 ve Eş. 13 ile bulunur:

$$T_f = \frac{X_g(t_{10}) + Gerçek\ 10."0" geçiş - [X_g(t_1) + Gerçek\ 1."0" geçiş]}{"0" geçiş sayısı - 1} \quad (12)$$

$$f_f = \frac{1}{T_f} \quad (13)$$

- Sentetik veri elde etmek için kullanılan  $A_f$  genliği ise FFT'si alınan  $N$  adet örnekten temel frekans bileşeni olan 50 Hz'e ait genlik kullanılarak elde edilir. Ancak burada sıfır geçiş yöntemi kullanılarak ve sıfıra en yakın değer alınarak pencere başlangıcı alındığı için, sentetik üretilecek sinyal ile orijinal sinyal arasında faz farkı olmaması için, sentetik sinyal sinüs ile üretilmektedir.  $f_f$  frekansının 50Hz'den kaymasından kaynaklanan sabit pencereli FFT'deki spektral kaçağı modellemek üzere  $u(t) = A_f \sin(2\pi f_f t)$  olarak üretilir.

Bu işaretin  $T = N / f_s$  periyoduyla pencerelenmiş hali Eş.14 ile şu şekilde gösterilir.

$$U_w(t) = A_f \sin(2\pi f_f t) w(t) \quad (14)$$

Pencere fonksiyonu  $w(t)$ 'nin Fourier dönüşümü Eş.15 ile gösterilmiştir.

$$W(\omega) = \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega/2} e^{-j\omega T/2} \quad (15)$$

Eş. 16'te ise  $x(t)$ 'nin Fourier dönüşümü verilmektedir.

$$U(\omega) = \pi A_f j [\delta(\omega + \omega_f) - \delta(\omega - \omega_f)] \quad (16)$$

elde edilir.  $x(t)$  işareti ile pencere fonksiyonu  $w(t)$ 'nin çarpımı, frekans alanında  $X(\omega)$  ile  $W(\omega)$ 'nin konvolüsyonuna denk gelir ve bu Eş. 17 ile ifade edilir:

$$U_w(\omega) = \pi j A_f \int W(\omega - \tau) [\delta(\omega + \omega_f) - \delta(\omega - \omega_f)] d\tau \quad (17)$$

Sinyal,  $f_s = N / T$  ile örneklenirse, frekans domenindeki örnekler tam  $\omega = \omega_f + 2\pi k / T$  frekanslarındaki sıfır geçiş noktalarından geçer. Diğer yandan örnekleme frekansı  $N/T$ 'den hafifçe saparsa pencerelemeye bağlı olarak spektrumda sızıntı bileşenler görülür. Bu sızıntı tipi grid effect (ızgara etkisi) olarak adlandırılır. Ancak, yukarıdaki gibi her bir pencere frekansı doğru bir şekilde hesaplanırsa, temel frekans kaymasıyla ortaya çıkan sızıntı etkisi sentetik veriyle hesaplanabilir ve araharmonik değerleri düzeltmek için orijinal sinyalden çıkartılır. Temel frekans bileşeninin genliği düzeltilmiş olarak Eş. 18 ile hesaplanabilir.

$$2\pi AT = |\pi j A_f \int W(\omega_n - \tau) [\delta(\omega + \omega_f) - \delta(\omega - \omega_f)] d\tau| \quad (18)$$

Burada

- $2\pi AT$  : FFT'den ölçülen temel bileşenin genliği
- $\omega_n$  : nominal temel frekans
- $A_f$  : sapsmış temel frekansın gerçek genliği

Bu ifadeden  $A_f$  değeri çekilerek gerçek temel frekans bileşeni Eş. 19 ile elde edilebilir.

$$A_f = \frac{2\pi AT}{\pi \int W(\omega_n - \tau) [\delta(\omega + \omega_f) - \delta(\omega - \omega_f)]} \quad (19)$$

- Sonuç olarak elde edilen bu ifadeler kullanılarak sentetik işaret Eş. 20 ile elde edilir:

$$v_s(t) = A_f \sin(2\pi f_f t) \quad (20)$$

- $v_s(t)$  ifadesinin de FFT'si alınarak spektral düzeltilmiş genlik ifadesi  $V_c[k]$  değeri de Eş. 21 ile bulunur. Çıkarma işlemi yapılmadan direkt  $V_c[k] = V[k]/A$  işlemi spektral düzeltme yapılmadığı anlamına gelmektedir.

$$V_c[k] = (V[k] - V_s[k])/A \quad (21)$$

Bu çıkarma işleminde temel harmonik bileşeni dışındaki bileşenler işleme tabi tutulur.

- S değerleri ise 50 Hz'in etrafındaki (25-75Hz) bileşenler yardımıyla 3 farklı yoldan Eş. 22, Eş. 23 ve Eş. 24 şeklinde elde edilmektedir.

$$S1 = \sum_{k=1}^{(N-1)/2} \left( \frac{\sqrt{V_c[k] * V_c[N-k+1]}}{\Delta V_{IEC(k)}/V} \right)^2 \quad (22)$$

$$S2 = \sum_{k=1}^N \left( \frac{|V_c[k]|}{\Delta V_{IEC(k)}/V} \right)^2 / 2 \quad (23)$$

$$S3 = \left( \sum_{k=1}^{(N-1)/2} \left( \frac{|V_c[k]| + |V_c[N-k+1]| + |V_c[-k]| + |V_c[-(N-k+1)]|}{4 \cdot \frac{\Delta V_{IEC(k)}}{V}} \right) \right)^2 \quad (24)$$

Bu S değerlerinin temel frekansın kaymaması ve bu frekansın tamsayı katıyla iyi bir örnekleme yapılması durumunda birbirine eşit çıkması beklenir. Ancak saha verisinde çok kısa zaman aralıklarında sistem frekansı değiştiği, çok yüksek miktarda kırışma bileşenleri meydana geldiği için FFT bileşenleri temel frekans etrafına eşit olarak dağılmamakta ve bu durum hatalı hesaplamalara yol açmaktadır. Bu durumu aşabilmek için hem spektral düzeltme hem de farklı S hesaplama yöntemleri üzerinde durulmuş ve farklı sonuçlar elde edilmiştir.

### 3. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

#### 3.1. Frekans Sapmasına Göre S1, S2 ve S3 Yöntemlerinin Kıyaslanması (Comparison of S1, S2 and S3 Methods with Respect to Frequency Deviation)

Frekans alanında 5 Hz çözünürlükte çalışılması durumunda, kırışma dalgalanmasının en hassas olduğu 8,8 Hz'e en yakın nokta olan  $f_B=10$  Hz ve IEC standardına göre Tablo 1'den de anlaşılacağı gibi  $S_{max} = 1$  değerini ( $P_{st} = 0,7146$ )

alacak olan  $\Delta V/V = 0,261$  seçilerek; Eş.1 yardımıyla sentetik bir sinyal üretilerek çalışma yapılmıştır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi frekansın sapması durumunda hesaplama hatası ortaya çıkmakta ve bu sapma çok kısa zaman aralıklarında çok fazla meydana gelmekte; bu nedenle 10 dakikalık veriyle direkt işlem yapmak yerine 9 çevrim örtüşmeli (overlapping) 0,2 sn pencerelemeli 3200 Hz ile örneklenen 10 dakikalık sentetik veri ile çalışılmış ve sonuçlar S1 S2 ve S3 için ayrı ayrı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2, 3 ve 4'te görüldüğü gibi temel frekansın 49,5 ile 50,5 aralığındaki her bir değeri için ayrı ayrı hesaplamalar yapılmış; spektral düzeltme yapılmazken yani Eş. 21 işlemi yerine direkt  $V_c[k] = V[k]/A$  üzerinden araharmonik hesaplaması yapılırken ortalama  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  değerlerinin temel frekans olan 50 Hz'den uzaklaştıkça çok fazla değiştiği açıkça görülmektedir. Bunu engellemek için kullanılan spektral düzeltmeye S değerindeki maksimum hatanın %1 olduğu görülmüştür. Eş. 22, Eş. 23 ve Eş. 24'te verilen S1, S2, ve S3 yöntemlerine göre karşılaştırma yapıldığıdaysa Eş. 22 ile verilen S1 yönteminin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Bu nedenle yapılan S1 yöntemi kullanılarak çalışmalara devam edilmiştir.

Tablo 3'te ise [25]'teki çalışma ile karşılaştırılması verilmiştir. Tablo 5'te de görüldüğü gibi IEC yöntemde  $S_{max} = 1$  ve  $P_{st} = 0,7146$  çıktığı gözönüne alındığında hem spektral düzeltmenin yapıldığı hem de yapılmadığı

**Tablo 2.** S1 Yöntemi ile Elde Edilen  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  Değerleri ( $S_{max}$  &  $P_{st}$  values obtained by S1 Method)

ff, Hz	Spektral Düzeltmesiz		Spektral Düzeltmeli	
	$S_{max}$	$P_{st}$	$S_{max}$	$P_{st}$
49,5	16819,38	92,8453	1,01	0,7198
49,6	10866,42	74,6430	1,01	0,7178
49,7	6157,31	56,2010	1	0,7165
49,8	2750,94	37,5782	1	0,7155
49,9	689,90	18,8324	1	0,7148
50	1	0,7139	1	0,7142
50,1	689,92	18,8479	1	0,7146
50,2	2751,09	37,6430	1	0,7153
50,3	6157,83	56,3452	1	0,7163
50,4	10867,64	74,8982	1,01	0,7178
50,5	16,821,73	93,2423	1,01	0,7203

**Tablo 3.** S2 Yöntemi ile Elde Edilen  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  Değerleri ( $S_{max}$  &  $P_{st}$  values obtained by S2 Method)

ff, Hz	Spektral Düzeltmesiz		Spektral Düzeltmeli	
	$S_{max}$	$P_{st}$	$S_{max}$	$P_{st}$
49,5	17171,01	94,4003	1,01	0,7206
49,6	11039,5	75,6481	1,01	0,7184
49,7	6231,95	56,7991	1,01	0,7168
49,8	2777,24	37,8894	1	0,7157
49,9	696,1	18,9621	1	0,7148
50	1	0,7139	1	0,7142
50,1	696,07	18,9306	1	0,7146
50,2	2777,07	37,7679	1	0,7154
50,3	6231,38	56,5243	1	0,7165
50,4	11038,17	75,1668	1,01	0,7180
50,5	17168,44	93,6648	1,01	0,7208



**Tablo 4.** S3 Yöntemi ile Elde Edilen  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  Değerleri ( $S_{max}$  &  $P_{st}$  values obtained by S3 Method)

$f_j$ , Hz	Spektral Düzeltmesiz		Spektral Düzeltmeli	
	$S_{max}$	$P_{st}$	$S_{max}$	$P_{st}$
49,5	16995,19	93,4606	1,01	0,7201
49,6	10952,09	75,0307	1,01	0,7180
49,7	6194,63	56,4266	1,01	0,7167
49,8	2764,09	37,6928	1	0,7156
49,9	693	18,8749	1	0,7148
50	1	0,7139	1	0,7142
50,1	693	18,8745	1	0,7146
50,2	2764,08	37,6904	1	0,7153
50,3	6194,61	56,4224	1	0,7164
50,4	10952,90	75,0233	1,01	0,7179
50,5	16995,09	93,4487	1,01	0,7205

**Tablo 5.** Önerilen Yöntem ile [25]'teki Yöntemin Karşılaştırılması (Comparison of proposed method & the method in [25])

$f_j$ , Hz	49,5	49,6	49,7	49,8	49,9	50	50,1	50,2	50,3	50,4	50,5		
Önerilen Yöntem	Spektral Düzeltmesiz	Mean,S	16819,4	10866,4	6157,3	2750,9	689,9	1	689,9	2751,1	6157,8	10867,6	16,821,7
		$P_{st}$	92,8453	74,6430	56,2010	37,5782	18,8324	0,7139	18,8479	37,6430	56,3452	74,8982	93,2423
	Spektral Düzeltmeli	Mean,S	1,01	1,01	1	1	1	1	1	1	1,01	1,01	
		$P_{st}$	0,7198	0,7178	0,7165	0,7155	0,7148	0,7142	0,7146	0,7153	0,7163	0,7178	0,7203
[25]deki yöntem	Spektral Düzeltmesiz	Mean,S	17718,3	11256,7	6296,2	2787,4	695,88	1	695,84	2787,1	6295,0	11,245,2	17713,2
		$P_{st}$	93,29	74,22	55,42	36,82	18,37	0,69	18,31	36,59	54,90	73,43	92,24
	Spektral Düzeltmeli	Mean,S	1,01	1,01	1	1	1	1	1	1	1,01	1,01	
		$P_{st}$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70

durumlarda temel frekanstan saptıkça önerilen yöntemin daha iyi sonuç verdiği açıkça görülmektedir.

### 3.2. Sinüzoidal Gerilim Dalgalanmasına Önerilen Yöntemin Cevabı

(Response of the Proposed Method for Sinusoidal Voltage Fluctuation)

Tablo 1'deki çeşitli frekanslara karşılık genlik değerleri Eş. 1'deki yerlerine konularak 5 Hz (0,2 sn'lik pencere) ve 0,5 Hz (2 sn'lik pencere) çözünürlükle çalışıldığında  $S_{max}$  değerleri araştırılmıştır. Tablo 4'te bu araştırmanın sonuçları verilmiştir.

Tablo 6'da da görüldüğü gibi 5 Hz çözünürlükte 5'in katı olan frekanslara sahip kırışma bileşenli işaretlerden  $S_{max}$  değeri hatasız elde edilirken; tam sayı katı olmayan 12 Hz bileşene sahip işaret için  $S_{max}$  değeri %1 hata ile elde edilmiştir. 0,5 Hz çözünürlük (2 sn) ile çalışıldığında hatasız elde edildiği görülmektedir. 0,5 Hz çözünürlükte çalışmak avantajlı görülebilmektedir. Ancak [28]'de de belirttiği

gibi frekans sapmasının belirlenmesi için 2 sn çok uzun bir süredir ve frekans hesaplanmasının ve FFT'nin doğru hesaplanamamasının getirebileceği hatadan dolayı 5 Hz çözünürlük (0,2 Hz lik pencereler) tercih edilmiştir.

### 3.3. Önerilen Yöntemin $P_{st}$ Homojenlik Testine Cevabı

(Response of the Proposed Method to the  $P_{st}$  Homogeneity Test)

Eş. 1'deki denklemde Tablo 1'deki çeşitli frekanslara karşılık genlik değerleri konularak 5 Hz (0,2 sn'lik pencere) ve  $\Delta V/V$  değerinin sırasıyla 0,5, 1 ve 2 katsayısıyla çalışıldığında  $P_{st}$  değerleri araştırılmıştır. Tablo 5'te bu araştırmanın sonuçları verilmiştir.

Tablo 7'de de görüldüğü gibi yapılan  $P_{st}$  testinde önerilen sistem [25]'te önerilen sisteme göre daha düşük % hata ile çıkış üretmiştir. Özellikle FFT nin 5 Hz çözünürlük için uygulandığı göz önüne alındığında 0,5, 2,5 ve 12 Hz gibi frekanslarda çok iyi sonuçlar ürettiği ve [25]'te verilen sonuçlara kıyasla daha iyi olduğu gözlenebilmektedir.

**3.4. Sinyalin 10 Hz'lik 5 ΔV/V Genlikli Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı**  
(Response Of Proposed Method in case the signal has 5 ΔV/V Amplitude Flicker Component)

Araştırılacak sinyal Eş. 25'te verilmektedir.

$$v(t) = V \sin(2\pi ft) \left\{ 1 + 5 \frac{\Delta V_{IEC}}{2V} \sin(2\pi 10t) \right\} \quad (25)$$

Bu sinyal için maksimum kırpışma hassasiyet değeri S; S1, S2 ve S3 için ayrı ayrı hesaplanarak hata oranlarıyla birlikte Tablo 8'de verilmektedir. Tablo 8'de de görüldüğü gibi sistem frekansının 49,5 ile 50,5 aralığında değişmesi

durumunda maksimum hata %1,16 olabilmekte; S1, S2 ve S3 yöntemleri arasında ise en iyi sonucu yine S1 yöntemi vermiştir.

**3.5. Sinyalin Birim Genlikli Birden Fazla Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı** (Response of Proposed Method in Case More Than One Flicker Components Exist with Unity ΔV/V Amplitude)

Araştırılacak sinyal Tablo 1'deki gibi  $S_{max}=1$  değerini verecek olan birim genliklerden oluşacak şekilde Eş. 26'da verilmektedir.

**Tablo 6.** Sinüzoidal Gerilim dalgalanmasına önerilen yöntemin cevabı  
(Response of proposed method to sinusoidal voltage fluctuation)

IEC kırpışmaölçerine göre S=1'i elde etmek için gerekli gerilim dalgalanması		Önerilen kırpışmaölçerin cevabı			
		5 Hz çözünürlük		0,5 Hz çözünürlük	
$f_B, Hz$	% ΔU/U	$S_{max}$	% hata	$S_{max}$	% hata
5	0,396	1	0,00	1	0,00
10	0,261	1	0,00	1	0,00
12	0,314	1,01	1,00	1	0,00
15	0,438	1	0,00	1	0,00
20	0,704	1	0,00	1	0,00
25	1,037	1	0,00	1	0,00

**Tablo 7.** Önerilen Yöntemin  $P_{st}$  Homojenlik Testine Cevabı (Response of proposed method to  $P_{st}$  homogeneity test)

$f_B/\Delta V/V$	Makaledeki $P_{st}$ sonuçları/% hata			Önerilen sistem için $P_{st}$ sonuçları/% hata		
	0,5*ΔV/V	ΔV/V	2*ΔV/V	0,5*ΔV/V	ΔV/V	2*ΔV/V
0,5	0,49/0,00	0,98/0,00	1,96/0,00	0,5110/-0,12	1,0232 /0,00	2,0488/ +0,12
2,5	0,30/-1,67	0,59/0,00	1,17/+0,84	0,6411/-0,32	1,2865/0,00	2,5668/-0,24
5	0,35/-1,45	0,69/0,00	1,38/0,00	0,3570/0,00	0,7140/0,00	1,4280/0,00
10	0,35/-1,45	0,69/0,00	1,38/0,00	0,3571/0,00	0,7142/0,00	1,4284/0,00
12	0,37/0,00	0,73/0,00	1,46/0,00	0,3789/0,00	0,7583/0,00	1,5167/0,00
15	0,35/-1,45	0,69/0,00	1,38/0,00	0,3573/0,00	0,7147/0,00	1,4294/0,00
18	0,39/0,00	0,78/0,00	1,55/+0,64	0,4034/-0,01	0,8069/0,00	1,6142/0,00
20	0,35/-1,45	0,69/0,00	1,38/0,00	0,3575/0,00	0,7149/0,00	1,4298/0,00
25	0,35/-1,45	0,69/0,00	1,38/0,00	0,3570/+0,02	0,7139/0,00	1,4277/0,00

**Tablo 8.** Sinyalin 10 Hz'lik  $5 \frac{\Delta V}{V}$  Genlikli Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı  
(Response of proposed method in case the signal has 5 ΔV/V amplitude flicker component)

$f_f, Hz/Yöntem$	S1	S1 %hata	S2	S2 %hata	S3	S3 %hata
49,5	25,27	+1,08	25,29	+1,16	25,28	+1,12
49,6	25,18	+0,720	25,20	+0,800	25,19	+0,760
49,7	25,11	+0,440	25,12	+0,480	25,12	+0,480
49,8	25,06	+0,240	25,07	+0,280	25,07	+0,280
49,9	25,03	+0,120	25,03	+0,120	25,03	+0,120
50	25,01	+0,0400	25,01	+0,0400	25,01	+0,0400
50,1	25,02	+0,0800	25,02	+0,0800	25,02	+0,0800
50,2	25,04	+0,160	25,04	+0,160	25,04	+0,160
50,3	25,07	+0,280	25,08	+0,320	25,08	+0,320
50,4	25,12	+0,480	25,14	+0,560	25,13	+0,520
50,5	25,20	+0,800	25,29	+1,16	25,21	+0,840

$$v(t) = V \sin(2\pi ft) \left( 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 5t) + \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 10t) + \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 15t) + \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 20t) + \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 25t) \right] \right) \quad (26)$$

Bu sinyal için maksimum kırpışma hassasiyet değeri S; S1, S2 ve S3 için ayrı ayrı hesaplanarak hata oranlarıyla birlikte Tablo 9'da verilmektedir.

Tablo 7'da bakıldığında maksimum hatanın %4,02 ile S2 yöntemiyle elde edildiği görülmüştür. Yine en az hatanın en fazla %1,08 ile S1 yönteminden elde edildiği kolaylıkla görülmektedir.

### 3.5. Sinyalin Farklı Genlikli Birden Fazla Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı

(Response Of Proposed Method in Case The Signal has Different  $\Delta V/V$  Amplitude More Than One Flicker Components)

Araştırılacak sinyal Tablo 1'deki gibi  $S_{max} = 1$  değerini verecek olan birim genliklerle çarpımından oluşacak şekilde Eş. 27'de verilmektedir.

$$v(t) = V \sin(2\pi ft) \left( 1 + \frac{1}{2} \left[ 5 \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 5t) + 4 \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 10t) + 3 \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 15t) + 2 \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 20t) + \frac{\Delta V_{IEC}}{V} \sin(2\pi 25t) \right] \right) \quad (27)$$

Bu sinyal için maksimum kırpışma hassasiyet değeri S; S1, S2 ve S3 için ayrı ayrı hesaplanarak hata oranlarıyla birlikte Tablo 10'da verilmektedir.

Son olarak tablo 10'a bakıldığında maksimum hatanın %5,40 ile S2 yöntemiyle elde edildiği görülmüştür. Yine en az hatanın en fazla %1,82 ile S1 yönteminden elde edildiği kolaylıkla görülmektedir.

### 3.6. Saha Verisi ile Alınan Sonuçlar (Results with Field Data)

Saha verisine önerilen yöntem uygulanırken her bir faz için 9 çevrim örtüşmeli (overlapping) 10 çevrimlik rms değerleri alınmıştır. Saha verisi Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında geliştirilen PQ<sup>+</sup> güç kalitesi çözümleyicileriyle elektrik iletim sisteminin ark ocaklarını besleyen bir transformatör merkezinden alınmış gerilim bilgisi kullanılmıştır [29]. Şekil 3.'te test için kullanılan gerilimlerin RMS değerleri

**Tablo 9.** Sinyalin Birim Genlikli Birden Fazla Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı (Response of Proposed Method in Case More Than One Flicker Components Exist with Unity  $\Delta V/V$  Amplitude)

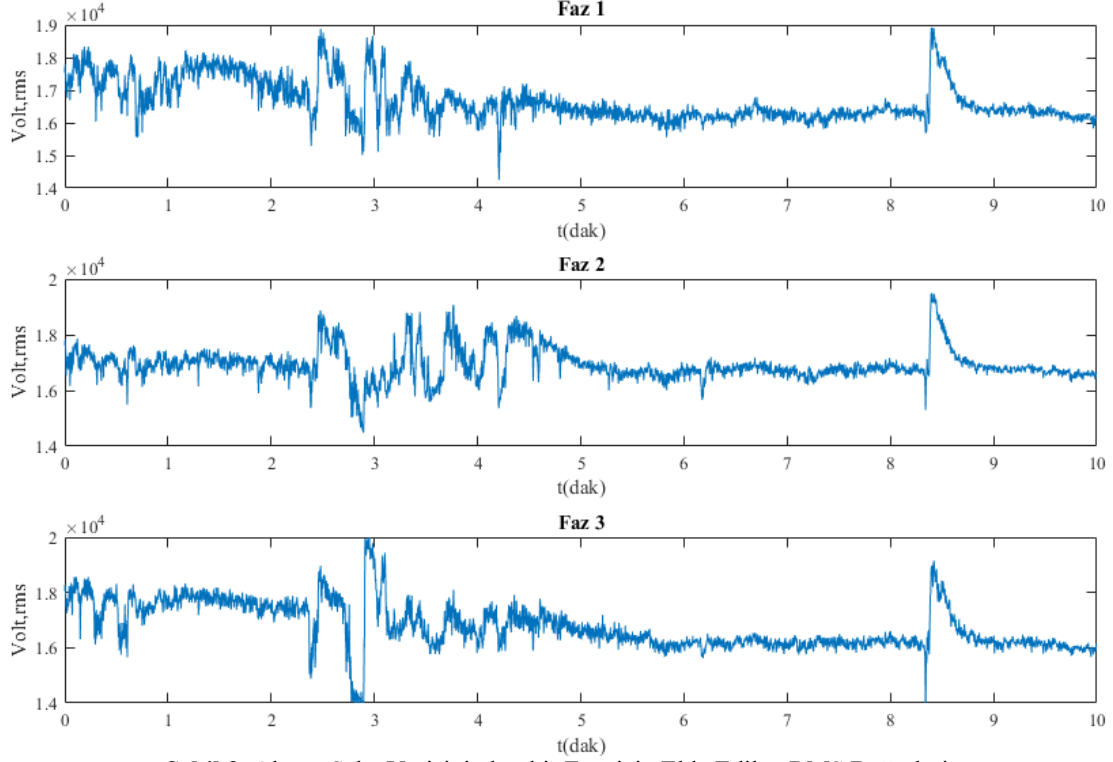
$f_s$ , Hz/Yöntem	S1	S1 %hata	S2	S2 %hata	S3	S3 %hata
49,5	5,09	1,08	5,21	4,02	5,15	3
49,6	5,05	1	5,13	2,06	5,09	1,08
49,7	5,03	0,6	5,08	1,06	5,05	1
49,8	5,02	0,4	5,04	0,8	5,03	0,6
49,9	5,01	0,2	5,01	0,2	5,01	0,2
50	5	0	5,01	0,2	5	0
50,1	5	0	5,01	0,2	5,01	0,2
50,2	5,01	0,2	5,03	0,6	5,02	0,4
50,3	5,03	0,6	5,07	1,04	5,05	1
50,4	5,05	1	5,13	2,06	5,09	1,08
50,5	5,09	1,08	5,20	4	5,15	3

**Tablo 10.** Sinyalin Farklı Genlikli Birden Fazla Kırpışma Bileşenine Sahip Olması Durumunda Önerilen Yöntemin Cevabı (Response of proposed method in case more than one flicker components with different  $\Delta V/V$  amplitude)

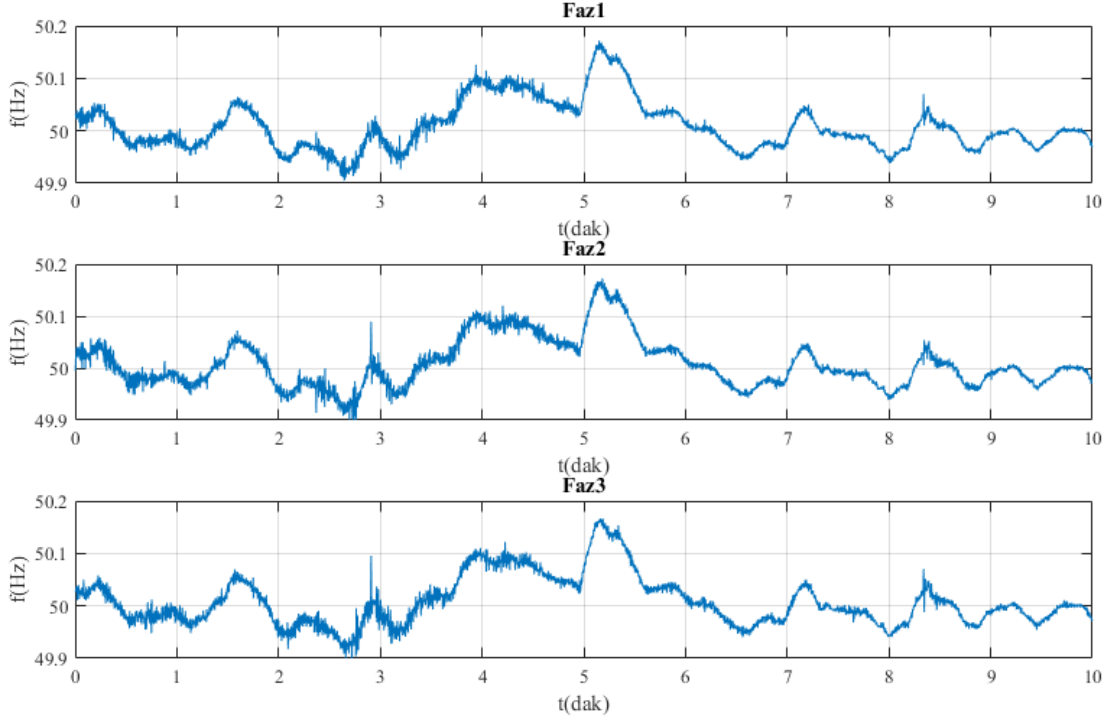
$f_s$ , Hz/Yöntem	S1	S1 %hata	S2	S2 %hata	S3	S3 %hata
49,5	55,75	+1,36	57,93	+5,33	56,84	+3,35
49,6	55,39	+0,710	56,86	+3,38	56,12	+2,04
49,7	55,21	+0,380	56,05	+1,91	55,63	+1,15
49,8	55,10	+0,180	55,48	+0,870	55,29	+0,530
49,9	55,04	+0,0700	55,15	+0,270	55,09	+0,160
50	55,03	+0,0500	55,06	+0,110	55,04	+0,0700
50,1	55,04	+0,0700	55,16	+0,290	55,10	+0,180
50,2	55,12	+0,220	55,51	+0,930	55,32	+0,580
50,3	55,26	+0,470	56,10	+2	55,68	+1,24
50,4	55,52	+0,950	56,92	+3,49	56,22	+2,22
50,5	56	+1,82	57,97	+5,40	56,99	+3,62

görülmektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi her bir faz benzer noktalardan rms değerinden uzaklaşmakla birlikte farklı karakteristiklere sahiptir. Bu nedenle her biri için ayrı ayrı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4'te bu verilere ait 9 çevrim

örtüşmeli (overlapping) 10 çevrimlik veriler halinde hesaplanan temel frekans değerlerindeki ortalama sapma sonuçları elde edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi her bir faz için frekans sapmalarında 49,9-50,2 Hz aralığında çok



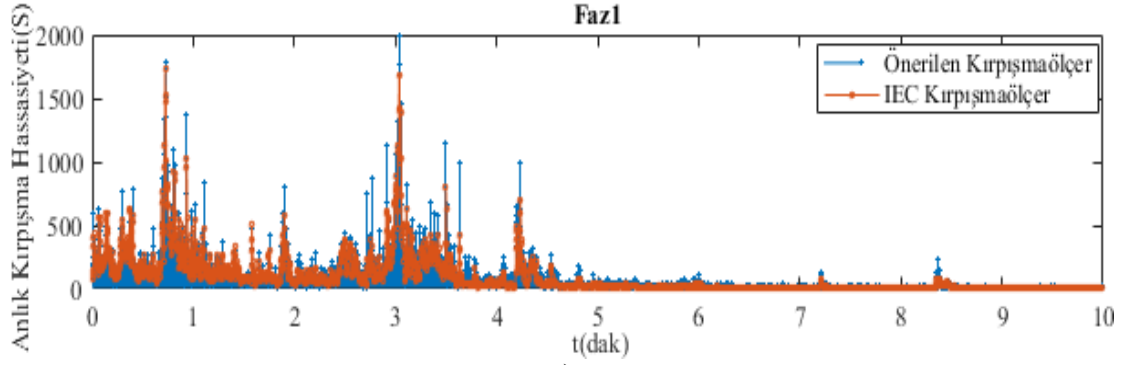
**Şekil 3.** Alınan Saha Verisinin her bir Fazı için Elde Edilen RMS Değerleri  
(RMS Values Obtained for Each Phase of the Field Data Used for Testing the Proposed Algorithm)



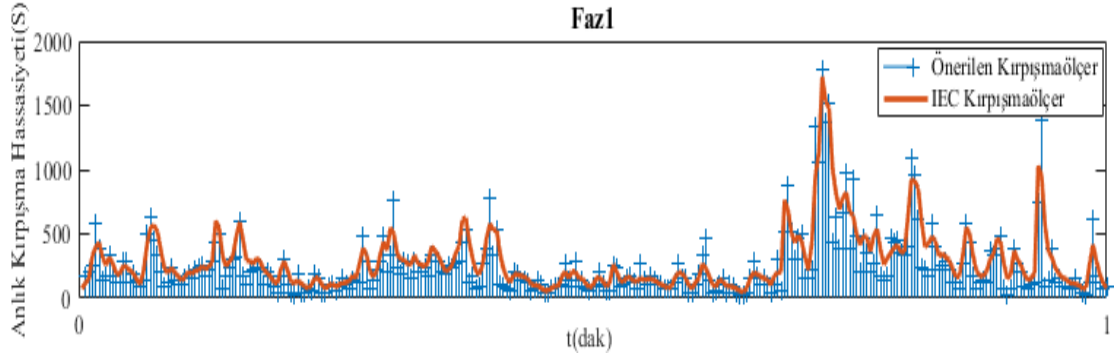
**Şekil 4.** Alınan Saha Verisinin Herbir Fazı İçin Elde Edilen Ortalama Frekans Sapması Değerleri  
(Mean Frequency Deviation Values Obtained for Each Phase of the Receiving Field Data)

büyük değişim gözlenmekle birlikte fazlar arasında çok küçük frekans farklılıkları göze çarpmaktadır. Sırasıyla Şekil

5, Şekil 6 ve Şekil 7'de de her bir faza ait anlık  $S$  değerleri görülmektedir. Bu  $S$  değerleri 9 çevrim örtüşmeli

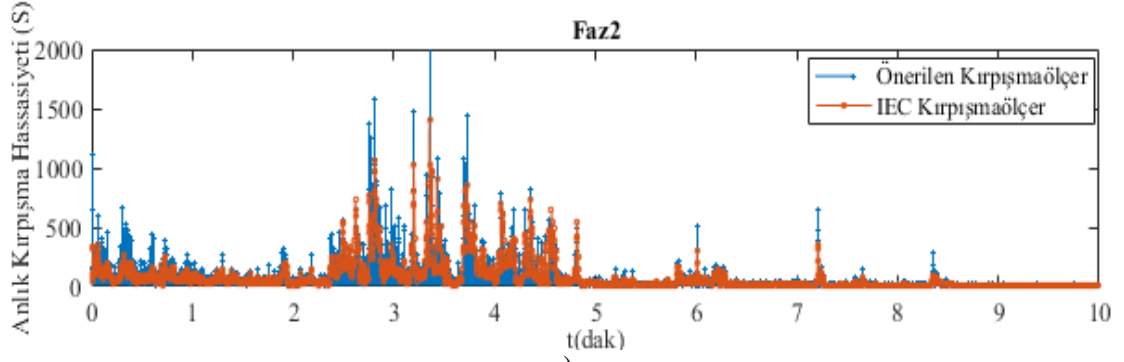


a)

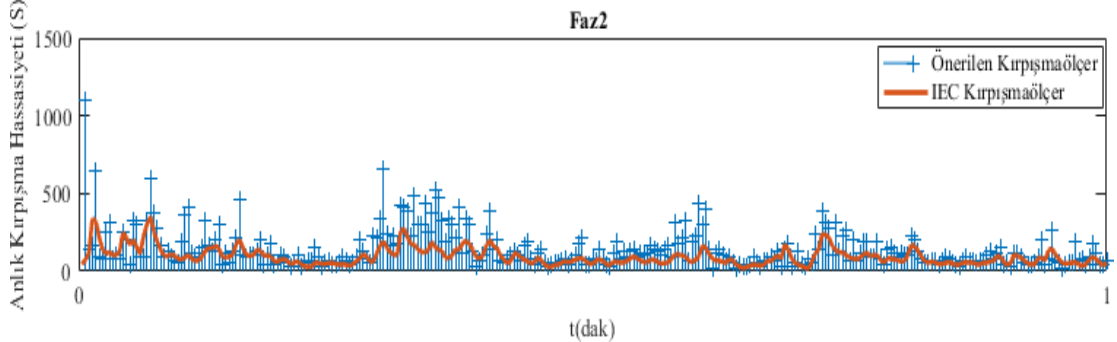


b)

Şekil 5. a) Faz 1'e ait 10 dakikalık  $S$  görüntüsü b) Faz 1'e ait 1 dakikalık  $S$  görüntüsü  
( a) 10 min S of phase-1 b) 1 min S of phase 1 )



a)



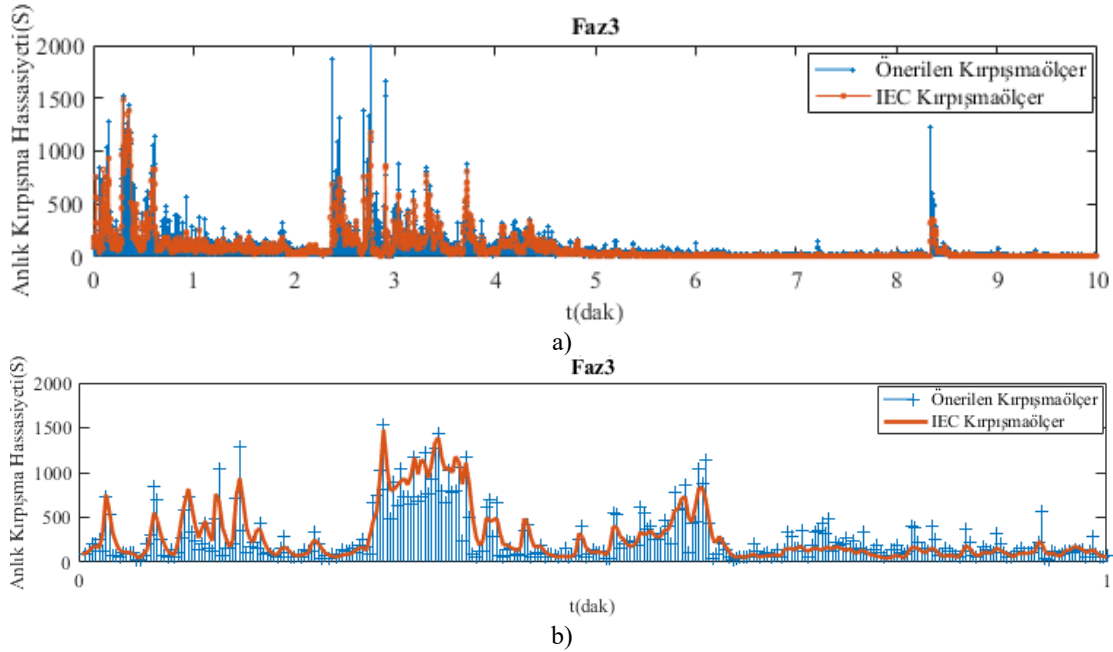
b)

Şekil 6. a) Faz 2'ye ait 10 dakikalık  $S$  görüntüsü b) Faz 2'e ait 1 dakikalık  $S$  görüntüsü  
( a) 10 min S of phase 2 b) 1 min S of phase 2 )

(overlapping) 10 çevrimlik veriler halinde hesaplanan herbir 0,2 sn. lik pencerenin toplam 10 çevrimin ortalaması olan  $S$  değeri ile elde edilmiştir. Sırasıyla üç şekilde de 10 ve 1 dakikalık verilerin  $S$  değerleri IEC yöntem ile önerilen yöntemin 0,2 saniyelik pencereler şeklinde ortalamaları karşılaştırılarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar şekillerden de görüldüğü gibi birbiriyile son derece uyumlu çıkmıştır.

Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da ise  $S$ 'e dayalı önerilen kırışmaölçer IEC maksimum kırışmaölçeri ve IEC kırışmaölçer karşılaştırması yapılmıştır. Bilindiği gibi  $S_{max}$  ve  $P_{st}$  değerleri IEC kırışmaölçer kullanılarak 10 dakikalık veri yardımıyla elde edilmektedir. Önerilen kırışmaölçerde referans olarak alınan tablo 1'deki değerlere bağlı olarak 9 çevrim örtüşmeli 10 çevrimlik pencerelerden elde edilen  $S_{max}$  değerlerinin ortalamalarından  $S$  değerlerini ve bu değerden bulunan  $P_{st}$  değerleri elde edilmektedir. IEC maksimum kırışmaölçerde ise tüm  $S$  değerlerini almak yerine her 0,2 saniye aralığındaki en büyük değer olan  $S_{max}$  değeri alınmış ve 9 örtüşmeli 10 pencereye bağlı olarak örtüşen bu  $S_{max}$  değerlerinin ortalamaları alınarak sonuca ulaşılmıştır. Bu sayede önerilen yöntemin hem IEC kırışmaölçerle uyumluluğu hem de  $S$  değerlerinin hesaplanmasında IEC kırışmaölçer için 9 örtüşmeli

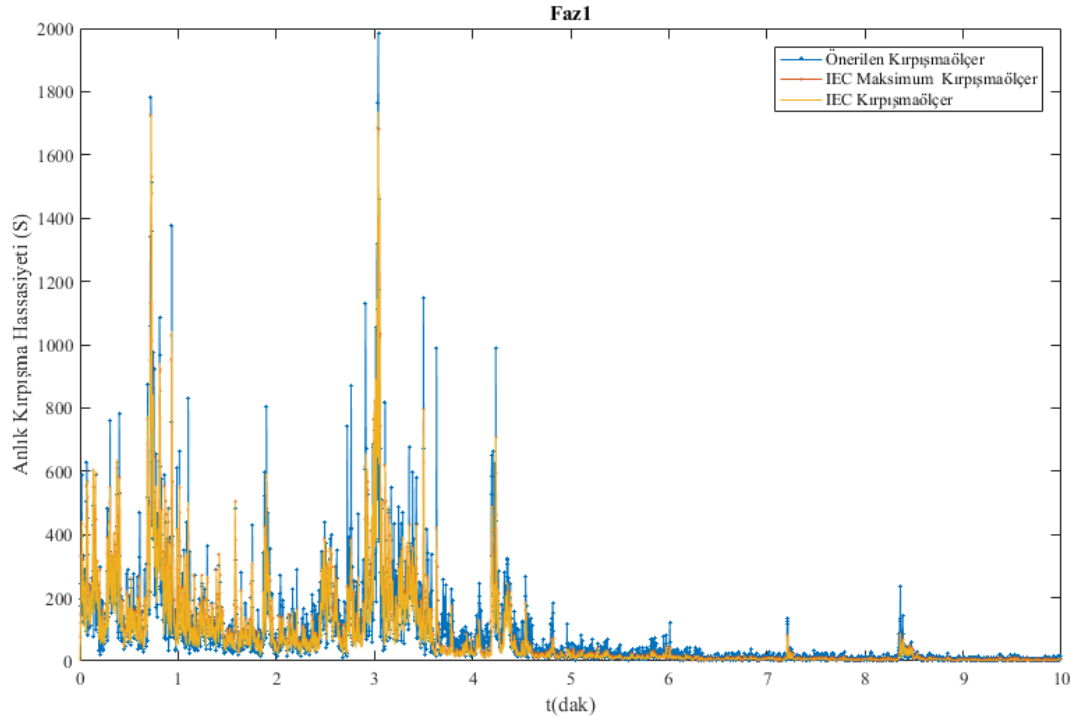
(overlapping) 10 çevrimlik 0,2 sn'lik penceredeki  $S_{max}$  değerlerinin ortalamalarının yeterli olduğu gösterilmiştir. Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da da görüldüğü gibi kullanılan herbir 9 çevrim örtüşmeli 0,2 saniyelik verinin maksimumunu almaya dayalı olan IEC maksimum kırışmaölçerinden elde edilen sonuç ile IEC kırışmaölçerinden elde edilen sonucun oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Her bir faz için 1 dakikalık veriye bakıldığında bu durum daha açık bir şekilde görülmektedir. Önerilen yöntem ise daha basit olmakla birlikte bu iki yöntemle elde edilen sonuçları yakından takip etmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi frekansı çok küçük zaman aralıklarında değişmesinden dolayı her bir 0,2 saniyelik pencerenin 9 çevrim örtüşmesi ile hesaplanması gerektiği açıktır. Öncelikli olarak IEC kırışmaölçer yöntemi yerine bu yöntemin uygulanmış olduğu IEC maksimum kırışmaölçer yöntemi tercih edilebilir. Ancak işlem kolaylığı açısından makalemizde önerilen yöntem tercih edilebilir. Herbir faza ait  $P_{st}$  değerleri belirtilen yöntemlere göre Tablo 11 ile verilmiştir. Tablo 9'dan da görüleceği ve daha önce belirtildiği gibi hassas ölçüm için herbir 0,2 sn'lik pencerenin maksimum değerleri alındığında (yani IEC maksimum kırışmaölçer uygulandığında) buna en yakın  $P_{st}$  her üç faz için de önerilen yöntem ile bulunmuştur.



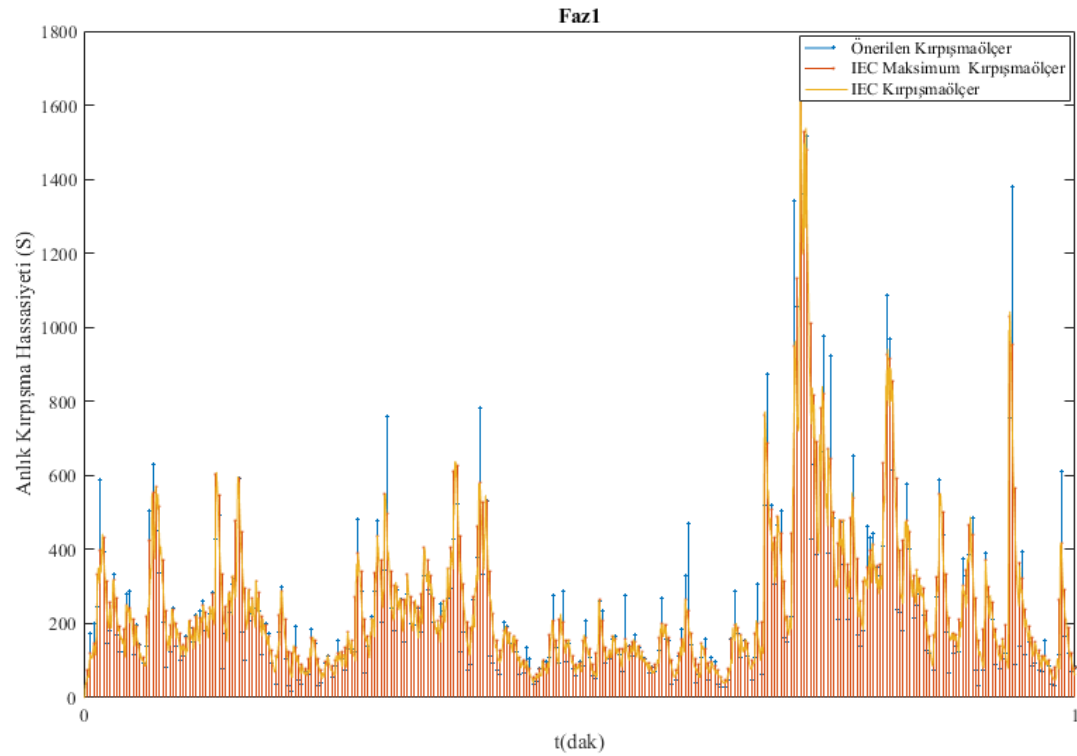
Şekil 7. a) Faz 3'e ait 10 dakikalık S görüntüsü b) Faz 3'e ait 1 dakikalık S görüntüsü  
(a) 10 min S image of phase 3 b) 1 min S image of phase 3 )

Tablo 11. Herbir Faza Ait Farklı Yöntemler İçin  $P_{st}$  Değerleri ( $P_{st}$  Values Obtained with Different Methods)

Yöntem/Faz	Faz1	% hata	Faz2	% hata	Faz3	% hata	Ortalama % hata
S1 Maksimum	13,5818	2,76	13,6091	8,65	14,0900	5,00	5,47
S2 Maksimum	14,3635	2,83	14,5326	16,02	15,0961	12,33	10,39
S3 Maksimum	13,9870	0,14	14,0961	12,54	14,5402	8,35	7,01
IEC Maksimum	13,9679	0	12,5255	0	13,4164	0	0

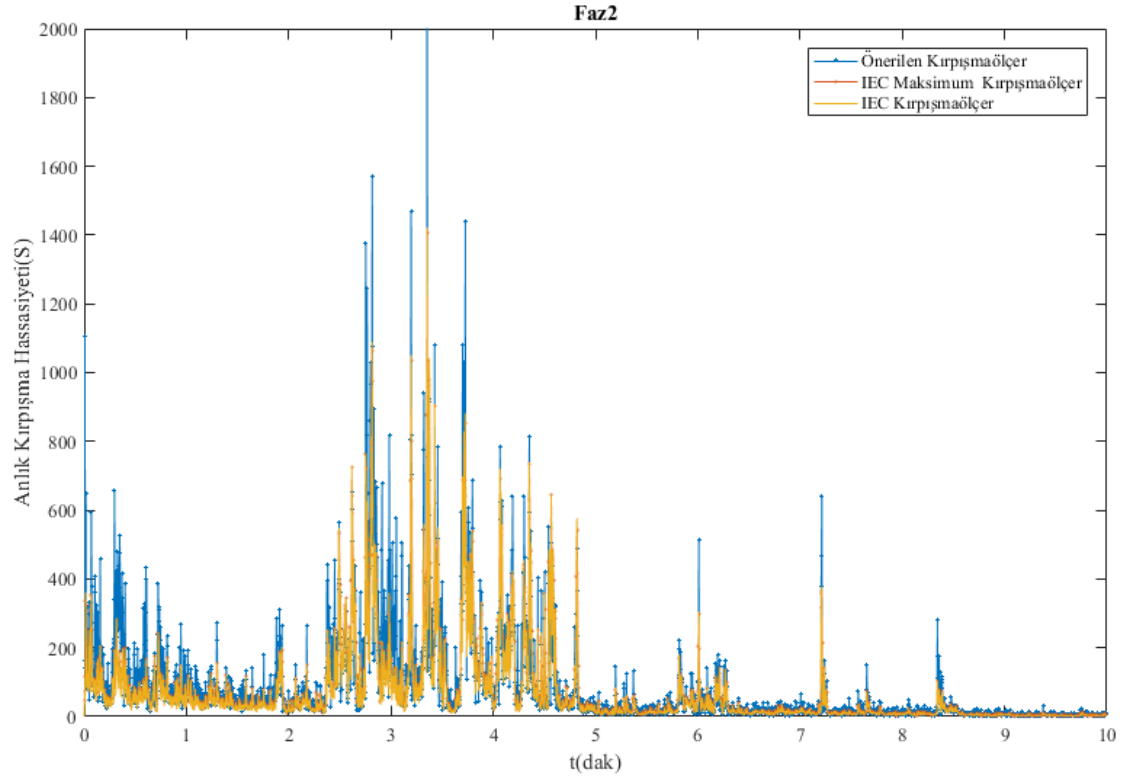


a)

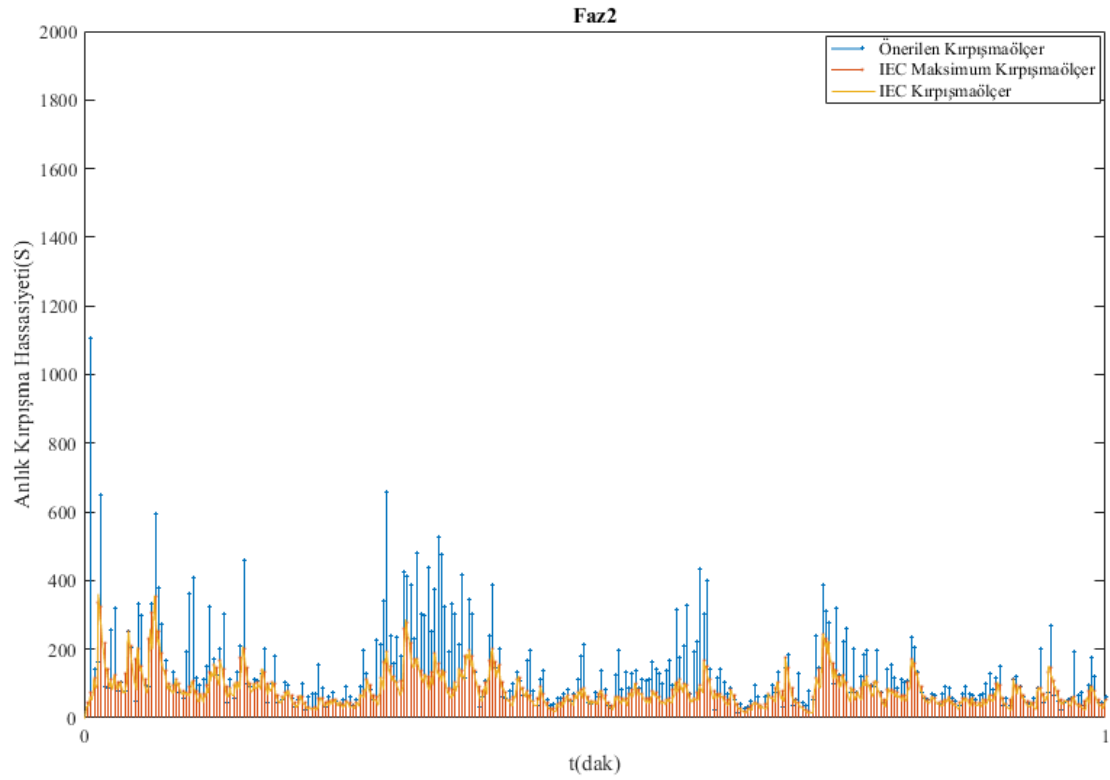


b)

**Şekil 8.** a) Faz 1'e ait karşılaştırmalı 10 dakikalık S görüntüleri b) Faz 1'e ait karşılaştırmalı 1 dakikalık S görüntüleri  
( a) 10 min S of phase 1 b) 1 min S of phase 1 )



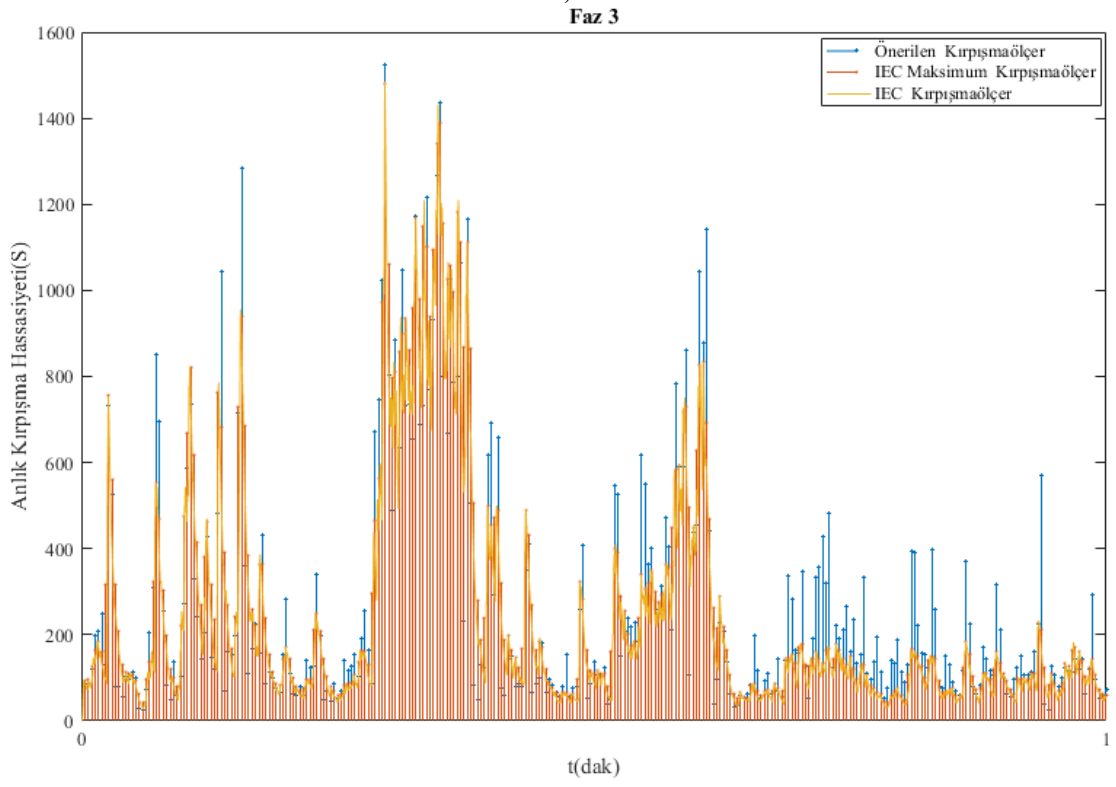
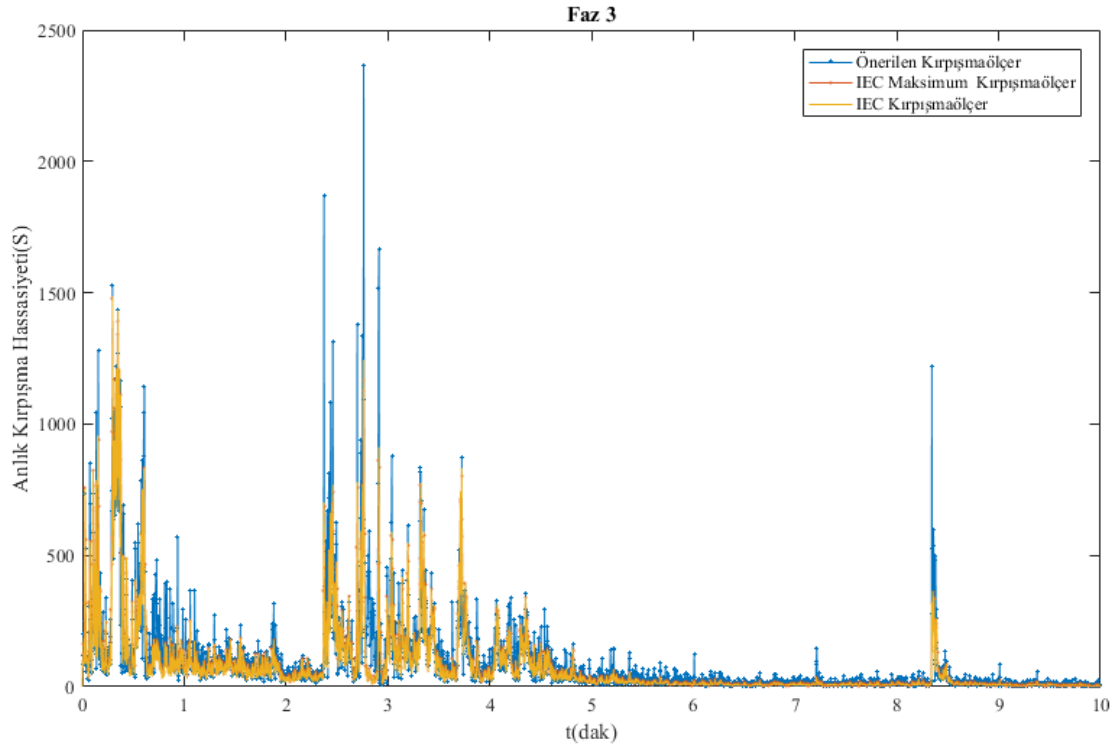
a)



b)

**Şekil 9.** a) Faz 2'ye ait karşılaştırmalı 10 dakikalık S görüntüleri b) Faz 2'e ait karşılaştırmalı 1 dakikalık S görüntüleri ( a) 10 min S images of phase 2 b) 1 min S images of phase 2 )





**Şekil 10.** a) Faz 3'e ait karşılaştırmalı 10 dakikalık S görüntüleri b) Faz 3'e ait karşılaştırmalı 1 dakikalık S görüntüleri  
( a) 10 min S of phase 3 b) 1 min S of phase 3)

Ortalama hatalara bakıldığında en düşük hatanın S1 yöntemi ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca IEC maksimum kırpışmaölçerinin frekans sapması durumunda hatalı olabileceği gözönüne alındığında S1 Maksimuma dayalı yöntemin hem  $S$  hem de  $P_{st}$  bakımından iyi bir hesaplama yöntemi olduğu söylenebilir.

Önerilen bu yöntemle hem hesaplama yükü ortadan kaldırılmış hem de Tablo 5 ve 7'deki sonuçlar [25]'teki sentetik veri sonuçlarıyla kıyaslandığında daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada IEC 61000-4-15 standardıyla belirlenen kırpışmaölçer yerine kullanılacak bir yöntem üzerinde durulmuştur. Bu yöntem, [25] ile verilen çalışmanın daha az hatalı çalışacak şekilde iyileştirilmesiyle elde edilmiştir. Önerilen yöntem sentetik veriler ve Türkiye elektrik iletim sisteminden alınan gerilim verisi üzerinde denenmiştir. Ayrıca saha verisinde yapılan ortalama ile elde edilen  $S$  değerlerinin gayet uyumlu olduğu,  $P_{st}$  değerlerinin ise en iyi % 2,76 hata ile elde edildiği ortalamada ise % 5,47'lik bir hata ile elde edildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar önerilen yöntem sadeleştirilmiş olduğu için ve saha verisinde sistem frekans anlık değiştiği için IEC 61000-4-15 max (en büyük) değerlerinin de hatalı olabileceği göz önüne alındığında tatmin edici sonuçlardır. Ayrıca [25] incelendiğinde; IEC 61000-4-15 kırpışmaölçerinin ilk 3 bloğundaki işlemlerde çeşitli bileşenlerin ihmal edildiği, 4. bloğundaki alçak geçiren filtre 300 ms'lik bir zaman sabitine sahip olduğundan bu filtreden sadece DC bileşenlerin geçtiği kabul edilerek Eş. 4 ifadesinin elde edildiği görülecektir. Ancak ihmal edilen 3,3 Hz'den küçük bileşenler ile 3,3 Hz'den büyük önemli büyüklükteki bileşenler ve ilk 3 blokta ihmal edilen diğer bileşenler saha verisindeki hesaplamadaki bu farklılığın sebepleri arasındadır. Özellikle faz 2'de kaynaklanan hata için ihmal edilen bu bileşenlerin yoğunlukta olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada, önerilen yöntem sentetik verilerde başarılı sonuçlar vermesi yanında elektrik iletim sisteminin ark ocaklarını besleyen ortak bağlantı noktalarından alınan verilerde de tatmin edici sonuçlar vermiştir. Bu nedenle hem doğrultuculara sahip olmasından hem de değişken güneş ve rüzgar gücü sebebiyle kırpışma bileşenlerinin yüksek olduğu güneş ve rüzgar enerjisi santrallerinde de kullanılabilirliği düşünülmektedir. Örneğin, rüzgar tarlalarının ortak bağlantı noktasında oluşturduğu kırpışmanın hesabı için, IEC 61400-21 standardında [12], her bir rüzgar türbininin oluşturacağı kırpışmanın hesabı için imgesel bir ağ oluşturularak bunun üzerinden IEC kırpışma ölçeri ile hesaplama yapılması, sonra ortak bağlantı noktasındaki kırpışmanın her bir türbin için yapılan hesapların karekök ortalama karesi olarak hesaplanması önerilmiştir. [16-21] arasındaki çalışmalarda IEC 61000-4-15 standardı kullanılarak rüzgar türbinleri ve güneş enerjisi sistemlerinde bu kırpışmanın sezilebileceği de önerilmiştir. Tüm bu nedenlerle önerilen yöntem, IEC kırpışma ölçeri ile birebir uyumlu olduğu ve hatta frekans sapması durumunda daha doğru kırpışma değerleri

hesaplayabildiği için, rüzgâr tarlalarının oluşturacağı kırpışmanın hesabı için de kullanılabilir. Daha iyi sonuçlar için önerilen yöntem benzer şekilde kısa dönemli frekans değişikliklerine cevap verebilecek ve tam çözüm sunabilecek yöntemler geliştirilebilir. İleriki çalışmalarda bu yöntem üzerinde durulacaktır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu makalede kullanılan saha verileri Güç Kalitesi Milli Projesi Kapsamında elde edilmiştir. Yazarlar TUBİTAK-KAMAG grubuna teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. IEC 61000-4-15: Electromagnetic Compatibility (EMC)—Testing and Measurement Techniques—Flickermeter—Functional and Design Specifications, 2010.
2. Lu H. J., Cheng G.W. Su H. J. A new method for flicker severity forecast , Power and Energy Society General Meeting (PES), Vancouver, Canada, 21-25 July, IEEE, 2013.
3. Moksic M.,Pepic I., Blezic B., Simple Continuous Assessment of Transmission Network Flicker Levels Caused by Multiple Sources,IEEE Transactions on Power Delivery, 31 (6), 2546-2552, 2015.
4. Balouji E., Salor Ö., Digital Realisation of the IEC flickermeter using root mean square of the voltage waveform, IET Generation Transmission& Distribution,10 (7),1663-1670,2015.
5. Gutierrez J.J., Azcarate I., Seitz P., Lazkan A., Leturiondo L. A. Redondo K., An alternative strategy to improve the flicker severity measurement, Electrical Power and Energy Systems, 667-673,2014.
6. Fahad A.H., Dutta P.P., Chowdhuer A. H. A Voltage Flicker Severity Analysis Module for Multiple Electric Arc Furnace Operation, 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka-Bangladesh, 643-646,20-22 December, 2014.
7. Huang S.J., Lu C.W., Enhancement of Digital Equivalent Voltage Flicker Measurement via Continuous Wavelet Transform, IEEE Transactions on Power Delivery, 19 (2), 666-670, 2004.
8. Turkuzan M., Salor O, Illumination Based Flickermeter Designed for Flicker Analysis of Electric Arc Furnace Plants, Portland- USA, 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1-8, 2016.
9. Astanei D., Munteanu F., Nemes C., Ciobanu A., Ionescu M., Adochitei M., Light Flicker Detection using High-Speed Imaging, The 7th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017), Cluj-Napoca, Romania, 1-4, 6-9 June, 2017.
10. Fooladi M., Foroud A. A., Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines, IET Renewable Power Generation, 10 (2), 250-259, 2016.
11. Hsu T.H., Korimara K., Cheng T.J., Power quality analysis for the distribution systems with a wind power generation system, Computers and Electrical Engineering, 54 (2016), 131–136, 2016.

12. IEC 61400-21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, International Electrotechnical Commission, 2001.
13. IEC 61000-3-3: Limits-Section 3: Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current, 2002.
14. Faranadia A.H., Omar A. M., NoorFaculty S.Z., Voltage Flicker Assessment of 15.3kWp Grid Connected Photovoltaic Systems, 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC 2017), Shah Alam, Malaysia, 1-6, 4 - 5 August 2017.
15. Wei D., Jingsheng H., Fei Z., Xiaolin Z., A Flicker Assessment Method for PV Plants Considering Solar Radiation Condition, 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016) Xi'an, 1-5, 10-13 Aug, 2016.
16. Redondo K., Gutierrez J. J., Saiz P., Leturiondo L. A., Azcarate I., and Lazkano A., Accurate Differentiation for Improving the Flicker Measurement in Wind Turbines IEEE Transactions On Power Delivery, 32 (1), 88-96, February 2017.
17. Lazkano A., Redondo K., Gutierrez J.J., Saiz P., Leturiondo L.A., and Azkarate I., Revision of the Standard Method for Statistical Evaluation of Flicker Coefficients in Wind Turbines, Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on Bucharest, Romania, 258-262, 25-28 May 2014.
18. Ding Z. D., Dong X., Liu Y., Zhu Y., Shen H., Voltage Flicker Assessment Of A Weak System Integrated Wind Farm, 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 0491, 10-13 June 2013.
19. Rahimi K., Omran S., Dilek M., Broadwater R., Computation of Voltage Flicker with Cloud Motion Simulator, IEEE Transactions on Industry Applications PP (99), 2017.
20. Hama N., Kanokbannakorn W., Sirisukprasert S., An Evaluation of Voltage Variation and Flicker Severity in Micro Grid, 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 1-4, 8-10 March 2017.
21. Niemi A., Lehtonen M., AbdelHadi H. A. R., Analysis of Solar Irradiance Variations as a Source of Flicker Associated with PV Systems, Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2017 IEEE PES, Torino- Italy, 1-6, 26-29 Sept. 2017.
22. Hernandez A. Mayordamo J.G., Asensi R., Beties L.F., A new frequency domain approach for flicker evaluation of arc furnaces, IEEE Transactions on Power Delivery, 18 (2), 631-638, 2003.
23. Wu C.J., Fu T.H., Effective voltage flicker calculation algorithm using indirect modulation method, IEEE Proceeding, Generation , Transmission, Distribution, 150 (4), 493-500, 2003.
24. Wu C.J., Chen Y.J., A novel Algorithm for precise voltage flicker calculation by using instantaneous voltage vector, IEEE Transactions on Power Delivery, 21 (3), 1541-1548, 2006.
25. Kose N., Salor Ö., New spectral decomposition based approach for flicker evaluation of electric arc furnaces, IET Generation, Transmission & Distribution, 3 (4), 393-411, 2009.
26. IEC 61000-4-7: Testing And Measurement Techniques-General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, 2005.
27. Duric M.B., Durisic Z.R. Frequency measurement in power networks in the presence of harmonics using Fourier and zero crossing technique, IEEE Proc. Power Tech., 27-30 June, St. Peterburg, Russia, 2005.
28. Salor Ö., Spectral Correction Based Method For Interharmonics Analysis Of Power Signals With Fundamental Frequency Deviation, Electric Power System Research, 79 (7), 1025-1031, 2009.
29. Atalık T., Çadırcı I., Demirci T., Ermis M., İnan T., Kalaycıoğlu A. S., Salor Ö., Multipurpose Platform for Power System Monitoring and Analysis With Sample Grid Applications, IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, 63 (3), 566-582, 2014.

