

## GÜÇ KALİTESİ BOZULMALARINDA HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

*Meltem KULU SÜPÜRTÜLÜ\**   
*Fahri VATANSEVER\** 

Alınma: 15.04.2020 ; düzeltme: 03.07.2020 ; kabul: 05.07.2020

**Öz:** Günümüz modern güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin, güç elektroniği elemanları ve devrelerinin artmasıyla birlikte güç kalitesi problemleri de ortaya çıkmaktadır. Güç kalitesini etkileyen unsurların başında da harmonikler yer almaktadır. Bu nedenle harmoniklerin tespit edilmesi, ölçülmesi, kestirimi ve bastırılması son derece önemlidir. Harmonik kestirimi için birçok yöntem ve teknikler mevcuttur. Ancak güç sistemlerinde meydana gelen bozukluklar, bu yöntemlerin performansını etkilemektedir. Gerçekleştirilen çalışmada; harmonik kestiriminde kullanılan on farklı yöntemin (hızlı Fourier dönüşümü, chirp z-dönüşümü, ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırma, Kalman filtre, en küçük ortalama kare, normalleştirilmiş en küçük ortalama kare, sızdıran en küçük ortalama kare) gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi ve dalga şekli bozulmalarındaki performansları incelenmiş ve karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Harmonik kestirimi, gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi, dalga şekli bozulması.

### Performance Analysis of Harmonic Estimation Methods in Power Quality Disturbances

**Abstract:** In modern power systems, power quality problems have occurred with an increase of non-linear loads, power electronics components and circuits. Harmonics are the fundamental factors that affect power quality. Therefore, it is significantly important to detect, measure, estimate and suppress harmonics. There are many methods and techniques for harmonic estimation. However, disturbances in power systems affect the performance of these methods. In this study; different ten methods used in harmonic estimation (fast Fourier transform, chirp z-transform, discrete Hartley transform, Hilbert-Huang transform, Prony method, multiple signal classification, Kalman filter, least mean square, normalized least mean square, leaky least mean square) their performance in voltage sag, voltage swell, voltage interruption, and waveform distortions were examined and their comparative analysis was done.

**Keywords:** Harmonic estimation, voltage sag, voltage swell, voltage interruption, waveform distortion.

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisiyle beslenen tüm güç sistemlerinde, çeşitli nedenlerden dolayı şebekenin akım/gerilim ve frekansında değişimler/bozulmalar meydana gelmekte ve bunlar bileşenlerin/cihazların çalışmalarını olumsuz yönde etkilemektedir. Geçici durumlar, kısa veya uzun süreli etkin değer değişimleri, gerilim/akım dengesizlikleri, dalga şekli bozulmaları, gerilim

\*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü, 16059 Bursa/Türkiye  
İletişim yazarı: Fahri Vatansever (fahriv@uludag.edu.tr)

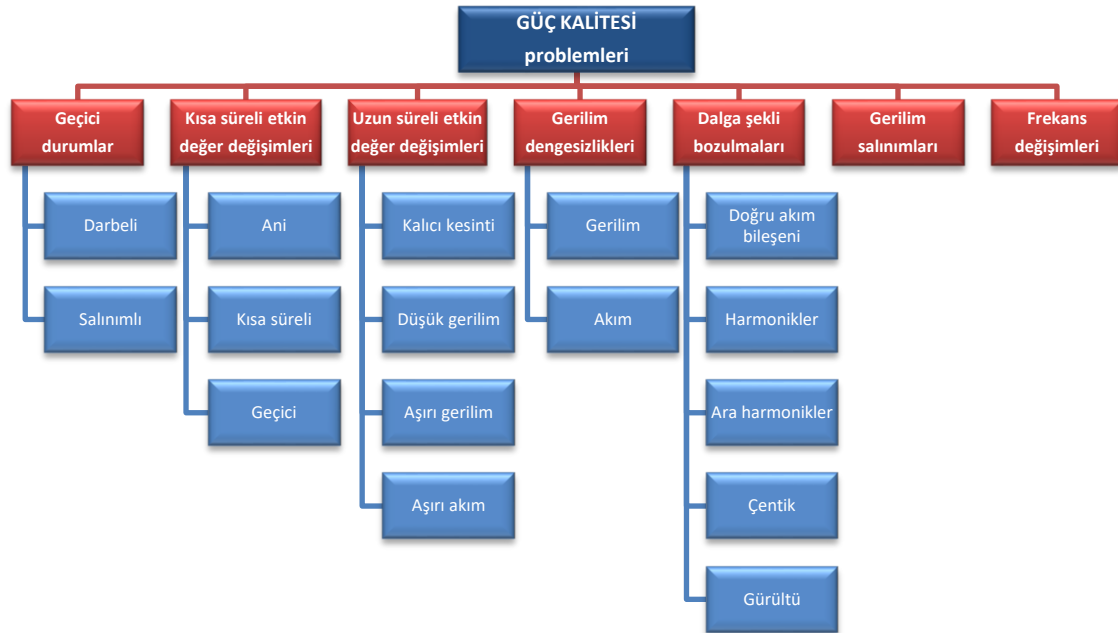
salınımları ve frekans değişimleri şeklinde gerçekleşebilen bu olumsuz durumlarda (güç kalitesi problemlerinde); sisteme ait birçok parametrenin (akım, gerilim, harmonik, güç vb.) doğru hesaplanması ve ölçümünde sıkıntılar yaşanabilmektedir.

Güç sistemlerinde, en öncelikli olarak ölçülmesi/izlenmesi gerekenlerden birisi de akım/gerilim değerleridir. Saf, doğru akım bileşenli veya harmonikli yapıda olabilen bu işaretlerin temel parametreleri olan genlik, frekans ve faz değerlerinin kestirimi/tespiti/ölçülmesi için birçok yöntem ve teknikler mevcuttur. Özellikle güç sistemlerinde anahtarlama elemanları ve doğrusal olmayan yüklerin artmasıyla, bu işaretler daha çok harmonikli yapıda olmaktadır. Güç sistemlerindeki harmonik analizleri için literatürde birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir (IEEE, 1984a; IEEE, 1984b; Singh, 2009; Jain and Singh, 2011).

Gerçekleştirilen çalışmada; güç kalitesini doğrudan etkileyen harmoniklerin kestiriminde yaygın olarak kullanılan on farklı yöntemin (hızlı Fourier dönüşümü (FFT), chirp z-dönüşümü (CZT), ayrık Hartley dönüşümü (DHT), Hilbert-Huang dönüşümü (HHT), Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırma (MUSIC), Kalman filtre, en küçük ortalama kare (LMS), normalleştirilmiş en küçük ortalama kare (NLMS), sızdıran en küçük ortalama kare (LLMS)), bazı güç kalitesi bozulmalarındaki performansları/başarımları incelenmiştir. Benzetimlerle oluşturulan farklı güç kalitesi problemlerinde, ilgili yöntemlerle genlik kestirimleri gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı performans sonuçları sunulmuştur.

## 2. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Güç kalitesi, güç sisteminin belirlenen bir noktasında düzgün sinüs biçimindeki gerilimin/akımın, anma genlik ve frekans değerinde bozulma olmaksızın sürdürülmesi olarak ifade edilmektedir. IEEE 1159-1995 standartlarına göre güç kalitesi problemleri; geçici durumlar, kısa süreli etkin değer değişimleri, uzun süreli etkin değer değişimleri, gerilim dengesizlikleri, dalga şekli bozulmaları, gerilim salınımları ve frekans değişimleri olmak üzere yedi gruba ayrılmaktadır (Şekil 1). Tablo 1'de farklı gruplardaki güç kalitesi problemleri için uygun tipik spektral içerik, olay süresi ve genlik değerleri; Tablo 2'de de güç kalitesi bozulmalarının bazı matematiksel ifadeleri görülmektedir (IEEE, 2019; Bollen and Gu, 2006; Uyar, 2008).



**Şekil 1:**  
Güç kalitesi problemleri

Güç kalitesi ölçümleri; harmonik genlikleri ve toplam harmonik bozulmanın ölçülmesini/hesaplanmasını içermekte olup harmonik bozulma iki IEC standardında ele alınmaktadır. Buna göre temel/nominal frekansı 50 ve 60 Hz olan sistemlerde analizler sırasıyla 10 ve 12 çevrimde (200 ms dalga şekli) yapılmalıdır (Rodrigues et al., 2018).

**Tablo 1. Güç kalitesi problemleri için tipik değerler**

Bozulma		Frekans spektrumu	Olayın süresi	Genlik	
Geçici durum	Darbeli	ns	5 ns yükselme	<50 ns	
		µs	1 µs yükselme	50 ns - 1 ms	
		ms	0.1 ms yükselme	> 1 ms	
	Salınımlı	Düşük frekans	<5 kHz	0.3 – 50 ms	
		Orta frekans	5 – 500 kHz	20 µs	
Yüksek frekans		0.5 – 5 MHz	5 µs		
Kısa süreli etkin değer değişimleri	Ani	Çökme	0.5 – 30 periyot	0.1 – 0.9 pu	
		Sıçrama	0.5 – 30 periyot	1.1 – 1.8 pu	
		Kesinti	0.5 – 30 periyot	<0.1 pu	
	Kısa süreli	Çökme	30 periyot – 3 s	0.1 – 0.9 pu	
		Sıçrama	30 periyot – 3 s	1.1 – 1.4 pu	
		Gerilim dengesizliği	30 periyot – 3 s	%2 – %15	
	Geçici	Kesinti	>3 s – 1 dk	<0.1 pu	
		Çökme	>3 s – 1 dk	0.1 – 0.9 pu	
		Sıçrama	>3 s – 1 dk	1.1 – 1.2 pu	
		Gerilim dengesizliği	>3 s – 1 dk	%2 – %15	
Uzun süreli etkin değer değişimleri	Kalıcı kesinti		>1 dk	0.0 pu	
	Düşük gerilim		>1 dk	0.8 – 0.9 pu	
	Aşırı gerilim		>1 dk	1.1 – 1.2 pu	
	Aşırı akım		>1 dk		
Gerilim dengesizliği	Gerilim		Sürekli durum	%0.5 – %5	
	Akım		Sürekli durum	%1 – %3	
Dalga şekli bozulmaları	Doğru akım bileşeni		Sürekli durum	%0 – %0.1	
	Harmonikler	0 – 100. harmonik	Sürekli durum	%0 – %20	
	Ara harmonikler	0 – 6 kHz	Sürekli durum	%0 – %2	
	Çentik		Sürekli durum		
	Gürültü	Geniş bant	Sürekli durum	%0 – %1	
Gerilim salınımları		<25 Hz	Kesintili	%0.1 – %7 0.2 – 2 P <sub>st</sub>	
Güç frekansı değişimleri			<10 s	± 0.1 Hz	

**Tablo 2. Bazı güç kalitesi bozulmalarının matematiksel ifadeleri**

Bozulma	Matematiksel İfade	Parametreler
Gerilim çökmesi	$v(t) = A\{1 - \alpha(\mu(t - t_1) - \mu(t - t_2))\} \sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Gerilim sıçraması	$v(t) = A\{1 + \alpha(\mu(t - t_1) - \mu(t - t_2))\} \sin(\omega t)$	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Kesinti	$v(t) = A\{1 - \alpha(\mu(t - t_1) - \mu(t - t_2))\} \sin(\omega t)$	$0.9 \leq \alpha \leq 1.0$ $T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$
Harmonik	$v(t) = A\{\alpha_1 \sin(\omega t) + \alpha_3 \sin(3\omega t) + \alpha_5 \sin(5\omega t) + \alpha_7 \sin(7\omega t) + \dots\}$	$0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15$
Saf sinüs işareti: $v(t) = A \sin(\omega t)$		$A = 1 pu$

### 3. HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİ

En genel anlamda parametre kestirimi; bir nesne veya fiziksel işlem/olaydan elde edilen verilere/ölçümlere dayanarak bunlarla (nesne, işlem, olay) ilgili parametrik açıklamanın/bağıntının ilişkilendirilmesi işlemidir. İşaretlerin parametre kestirimi tipik olarak genlik, frekans ve faz bilgilerini içermektedir. Bu parametreleri kestirmek için tasarım felsefelerine veya performans değerlendirmelerinde kullanılan metriğe göre çok sayıda farklı yöntemler uygulanabilmektedir (Levy, 2008; Lei et al., 2017; ).

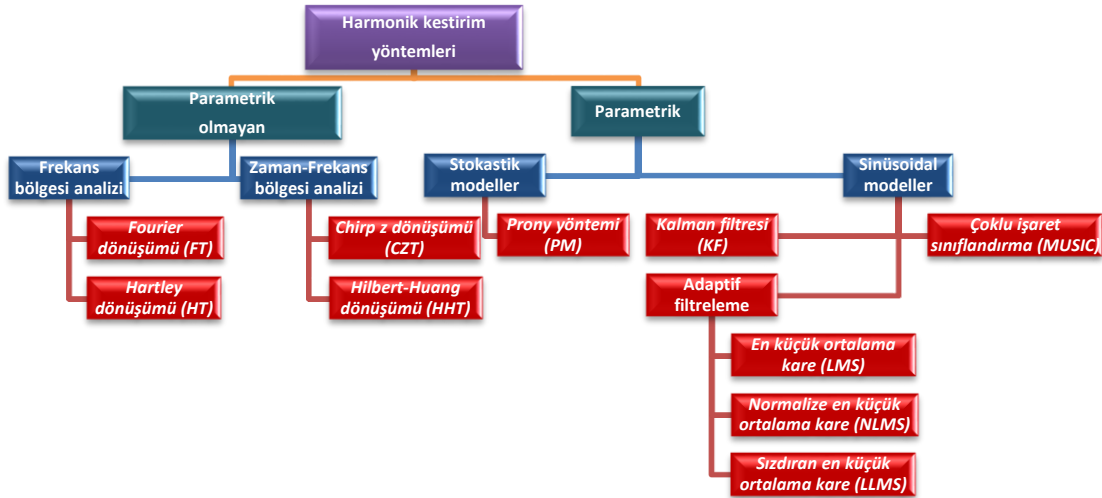
Güç kalitesini belirleyen faktörlerden biri olan harmoniklerin ölçülmesi, hesaplanması, modellenmesi ve kestirimi için birçok yöntem ve teknikler mevcuttur. Harmonik bileşenlerin genlik, frekans ve faz bilgilerini tespit eden bu kestirim yöntemleri, temel olarak üç gruba ayrılmaktadırlar: parametrik, parametrik olmayan ve hibrit yöntemler (Şekil 2). Parametrik yöntemlerde; matematiksel denklemlerle/modellerle tanımlanan işaret parametreleri (genlik, frekans ve faz), bu denklemlerin deterministik veya stokastik çözümleriyle elde edilmektedir. Parametrik olmayan yöntemler ise önceden tanımlanmış parametrelere bağlı olmadan işaretli bileşenlerine ayrıştırabilen yöntemlerdir (Yalcin and Vatansever, 2020).



Şekil 2:

Harmonik kestirim yöntemlerinin genel sınıflandırması

İşaretlerin yapıları ve modellerine göre her alanda çeşitli kestirim yöntemleri/teknikleri önerilmiştir. Genellikle işaretlerin parametre (genlik, frekans ve faz) kestiriminde Fourier dönüşümü, doğrusal kestirim teknikleri, en küçük karesel hatalar ve türleri, adaptif filtreler, Kalman filtreleri, yapay sinir ağları, evrimsel/sezgisel algoritmalar gibi yöntem ve tekniklere dayanan uygulamalar da mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan yöntemler Şekil 3'te ve bu yöntemlere ait temel ifadeler, Tablo 3'te özetlenmektedir (Acha and Madrigal, 2002; Bollen and Gu, 2006; Singh, 2009; Chang and Chen, 2010; Poularikas, 2010; Jain and Singh, 2011; Kulu, 2020). Burada parametrik olmayan yöntemler (Oppenheim and Schaffer, 1989; Bi and Zeng, 2004) grubunda frekans bölgesi için Fourier dönüşümü (Cooley and Tukey, 1965) ve Hartley dönüşümü (Hartley, 1942; Bracewell, 1984; Hou, 1987; Vatansever ve Yalcın, 2016; Vatansever and Yalcin, 2018); zaman-frekans bölgesi için de chirp-z dönüşümü (Rabiner ve diğ., 1969) ve Hilbert-Huang dönüşümü (Huang et al., 1998; Rilling et al., 2003) analizleri yapılmıştır. Parametrik yöntemler grubunda ise stokastik modeller için Prony yöntemi (Qi et al., 2007; Vatansever ve Çengelci, 2011; Yalcin and Vatansever, 2020) ve sinüsoidal modeller için de MUSIC yöntemi (Schmidt, 1981; Kay, 1988), Kalman filtresi (Kalman, 1960; Welch and Bishop, 2006) ve bazı adaptif filtreler (LMS, NLMS, LLMS) (Mayyas and Aboulnasr, 1997; Haykin, 2001; Sayed, 2008) kullanılmıştır.



Şekil 3:

Gerçekleştirilen çalışmada kullanılan yöntemler

**Tablo 3. Kullanılan yöntemlere ait temel ifadeler**

Yöntem	İfade	Açıklama
<b>Ayrık Fourier dönüşümü</b>	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$	$0 \leq k \leq N-1$
<b>Ayrık Hartley dönüşümü</b>	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)Cas\left(\frac{2\pi}{N}kn\right)$	$0 \leq k, n \leq N-1$ $Cas(a) = Cos(a) + Sin(a)$
<b>Chirp z dönüşümü</b>	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z_k^{-n}$	$0 \leq k \leq M-1$ $z_k = A.W^{-k}$ $A = A_0e^{j2\pi\theta_0}, W = W_0e^{j2\pi\phi_0}$
<b>Hilbert-Huang dönüşümü</b>	$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t), y_j(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_j(\tau)}{t-\tau} d\tau$ $z_j(t) = c_j(t) + iy_j(t)e^{i\theta_j(t)}$ $a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)}, \theta_j(t) = \arctan\frac{y_j(t)}{c_j(t)}, \omega_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt}$	$P$ : İntegralin Cauchy prensip değeri $x(t)$ : Verilerin $n$ -ampirik modlara ayrıştırılması
<b>Prony yöntemi</b>	$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^p A_i e^{\sigma_i t} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ $y_N = a_1 y_{N-1} + a_2 y_{N-2} + \dots + a_p y_{N-p}$ $\begin{bmatrix} y_p \\ y_{p+1} \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{p-1} & y_{p-2} & \dots & y_0 \\ y_p & y_{p-1} & \dots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{N-2} & y_{N-3} & \dots & y_{N-p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \Rightarrow a = C^{-1} \cdot B$ $\mu^p - a_1 \mu^{p-1} - \dots - a_{p-1} \mu - a_p = 0$ $\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \mu_1 & \mu_2 & \dots & \mu_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_1^{N-1} & \mu_2^{N-1} & \dots & \mu_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_p \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} D = E^{-1}F \\ D_i = \frac{A_i}{2} e^{j\varphi_i} \end{cases}$ $\varphi_i = \text{ArcTan}\left\{\frac{\text{Im}(D_i)}{\text{Re}(D_i)}\right\}, A_i = \frac{2\text{Re}(D_i)}{\text{Cos}(\varphi_i)}, f_i = \frac{1}{2\pi T} \text{Im}\{Ln(\mu_i)\}$	$T$ : Örnekleme periyodu
<b>Kalman filtresi</b>	$y_{n+1} = \phi_n y_n + \omega_n$ $x_n = h_n y_n + \eta_n$ $y_n = y_n^0 + K_n(x_n - h_n y_n^0)$	$y_n$ : Durum vektörü, $x_n$ : Ölçüm vektörü $\omega_n$ : Modelin hatası, $\eta_n$ : Ölçüm hatası $\phi_n$ : Durum geçiş matrisi, $h_n$ : Çıktı matrisi, $K_n$ : Kalman kazancı
<b>Çoklu işaret sınıflandırma</b>	$x(t) = As(t) + n(t)$ $R_x = E\{xx^H\} = AR_s A^H + \sigma_n^2 I, R_x = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x(t)x(t)^H$ $\hat{P}_{MU}(e^{j\omega}) = \frac{1}{\sum_{i=p+1}^N  e^H v_i ^2}$	$s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_p(t)]$ $A = [A(\theta_1) A(\theta_2)  \dots  A(\theta_D)]$ $R$ : Kovaryans matrisi $e = [1 \ e^{j\omega} \ \dots \ e^{j(M-1)\omega}]^T$ $v_i$ : Gürültü özvektörleri
<b>En küçük ortalama kare</b>	$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n)$	$w(n)$ : $n$ anındaki filtre katsayıları $x(n)$ : Giriş verisi/işareti $y(n) = w^T(n)x(n)$ : Filtre çıkışı $e(n) = d(n) - y(n)$ : Hata $d(n)$ : İstenen veri/işaret $\mu$ : Adım parametresi $M$ : Filtre derecesi
<b>Normalize en küçük ortalama kare</b>	$w(n+1) = w(n) + \frac{\mu}{\ x(n)\ ^2} e(n)x(n)$	$\ x(n)\ ^2 = x(n)^T x(n)$
<b>Sızdıran en küçük ortalama kare</b>	$w(n+1) = (1 - \mu\gamma)w(n) + \mu e(n)x(n)$	$\gamma$ : Sızdırma katsayısı ( $0 < \gamma \ll 1$ )

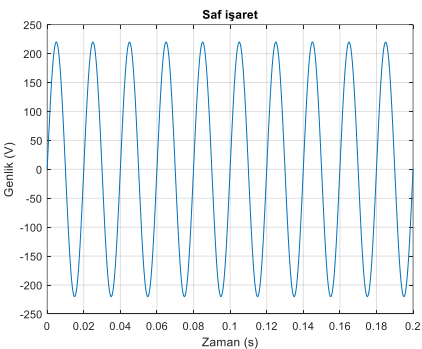
#### 4. GÜÇ KALİTESİ BOZULMALARINDA YÖNTEMLERİN BAŞARIMLARI

Gerçekleştirilen çalışmada temel harmonik (saf sinüs) işareti üzerinde güç kalitesi bozulmaları oluşturulmuş ve farklı yöntemlerle genlik kestirimleri karşılaştırılmıştır. Harmonik kestirim yöntemlerinin başarımını test etmek için

$$v(t) = 220\sin(2\pi 50t) \quad (1)$$

gerilim işareti üzerinde MATLAB (MathWorks, 2018) ortamında bazı durumlar oluşturulmuş ve değer hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'te saf sinüs işareti, Tablo 4'te gerilim çökmesi, Tablo 5'te gerilim sıçraması, Tablo 6'da gerilim kesintisi ve Tablo 7'de de dalga şekli bozulması (beşinci harmonik) durumları - matematiksel ifadeleri ve grafiksel gösterimleri - ile birlikte yer almaktadır. Ayrıca bu tablolarda hızlı Fourier dönüşümü, chirp z-dönüşümü, ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırma, Kalman filtre, en küçük ortalama kare, normalleştirilmiş en küçük ortalama kare ve sızdıran en küçük ortalama kare yöntemleriyle elde edilmiş sonuçlarla bağıl hata yüzdeleri hem sayısal hem de grafiksel olarak verilmektedir. Tablo 4-8'den görüldüğü gibi FFT, DHT, HHT, Prony gibi yöntemler çok yüksek doğruluklarla işaretin etkin genliğini tespit edebilmektedir. Fourier dönüşümü gibi trigonometrik baz fonksiyonlarına dayanan dönüşüm yöntemlerinde, durağan sinüsoidal işaretlerde parametre kestiriminin başarımını ortaya koymaktadır.

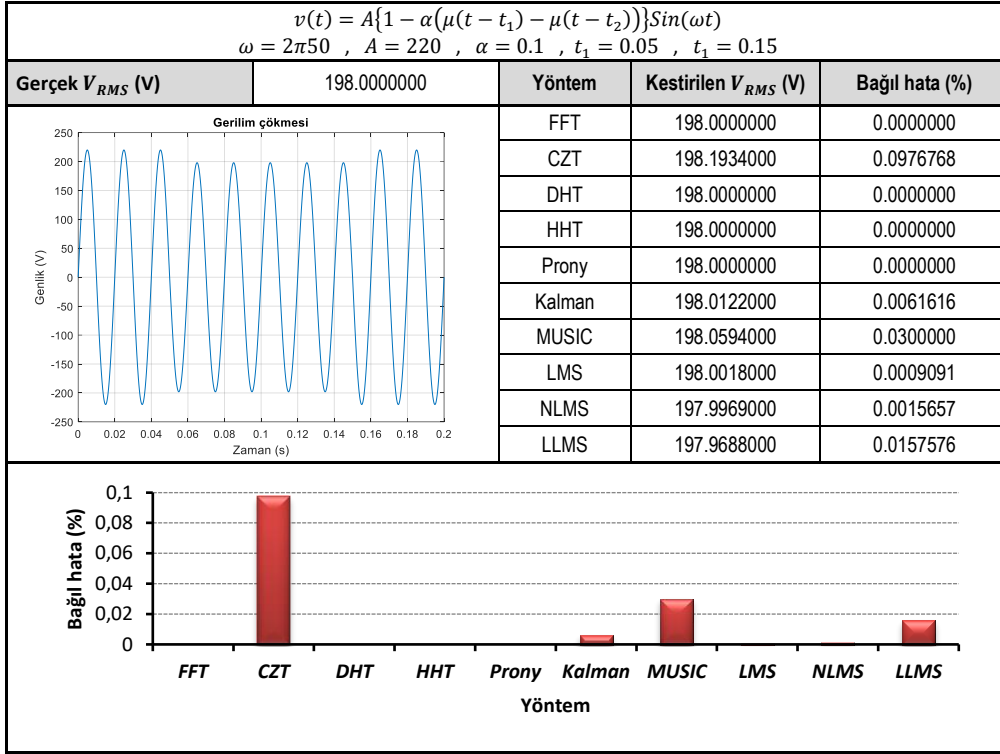
**Tablo 4. Saf sinüs işareti için kestirim sonuçları**

$v(t) = 220\sin(2\pi 50t)$				
Gerçek $V_{RMS}$ (V)	220.0000000	Yöntem	Kestirilen $V_{RMS}$ (V)	Bağıl hata (%)
	FFT	220.0000000	0.0000000	
	CZT	220.2031000	0.0923182	
	DHT	220.0000000	0.0000000	
	HHT	220.0000000	0.0000000	
	Prony	220.0000000	0.0000000	
	Kalman	220.0097000	0.0044091	
	MUSIC	220.0660000	0.0300000	
	LMS	220.0019000	0.0008636	
	NLMS	220.0022000	0.0010000	
	LLMS	219.9631000	0.0167727	

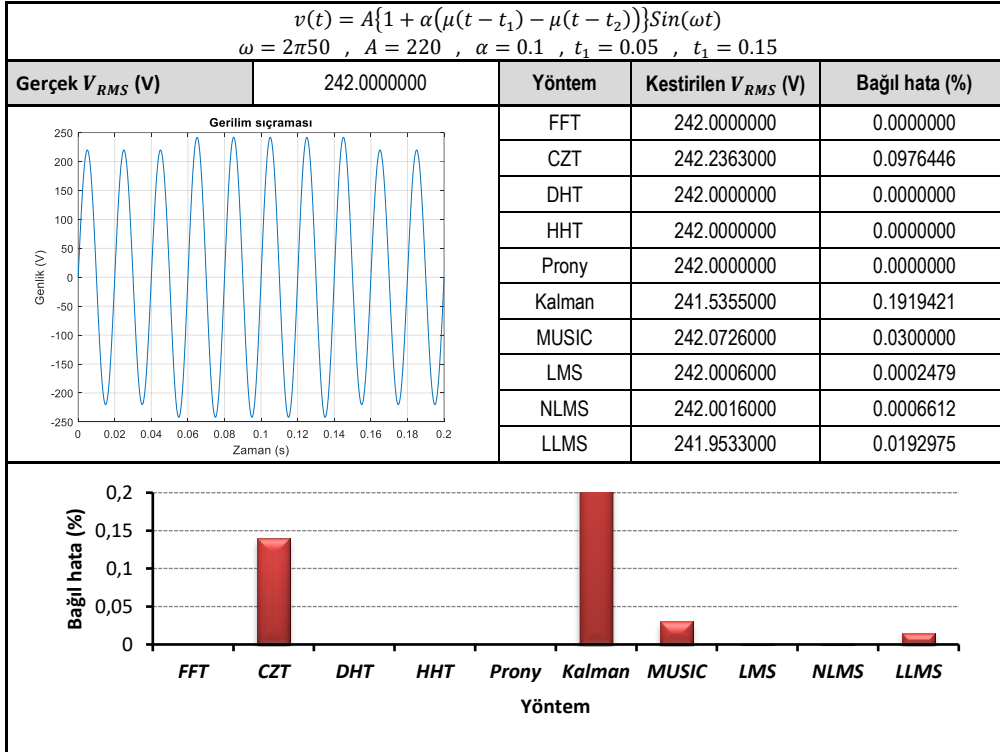
  

Yöntem	Bağıl hata (%)
FFT	0.0000000
CZT	0.0923182
DHT	0.0000000
HHT	0.0000000
Prony	0.0000000
Kalman	0.0044091
MUSIC	0.0300000
LMS	0.0008636
NLMS	0.0010000
LLMS	0.0167727

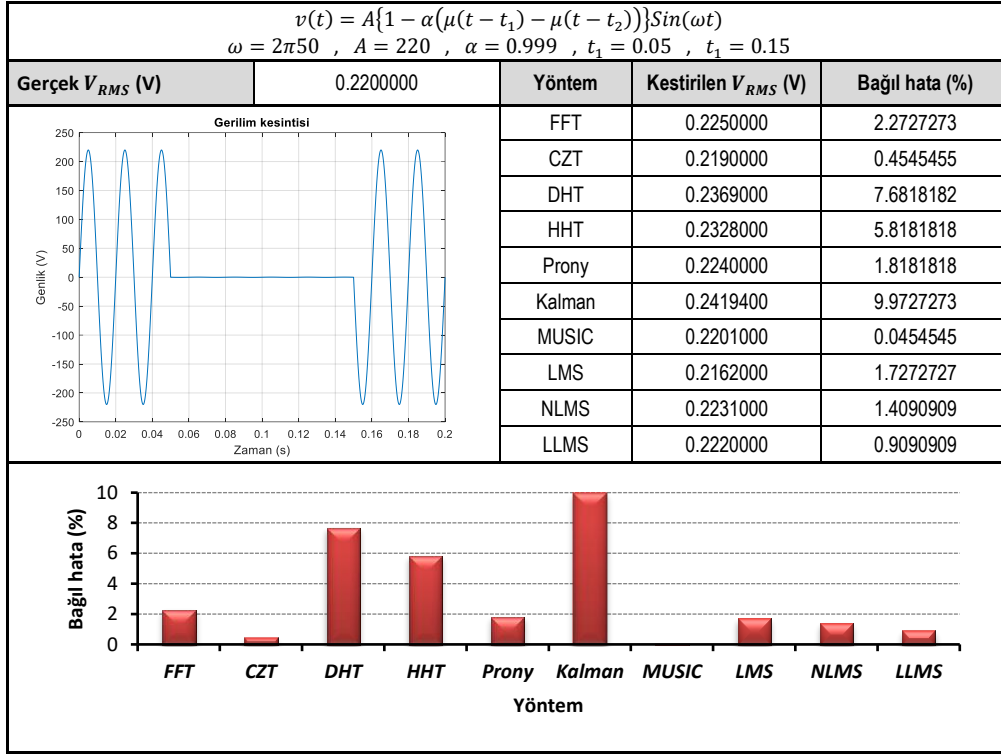
**Tablo 5. Gerilim çökmesi durumunda kestirim sonuçları**



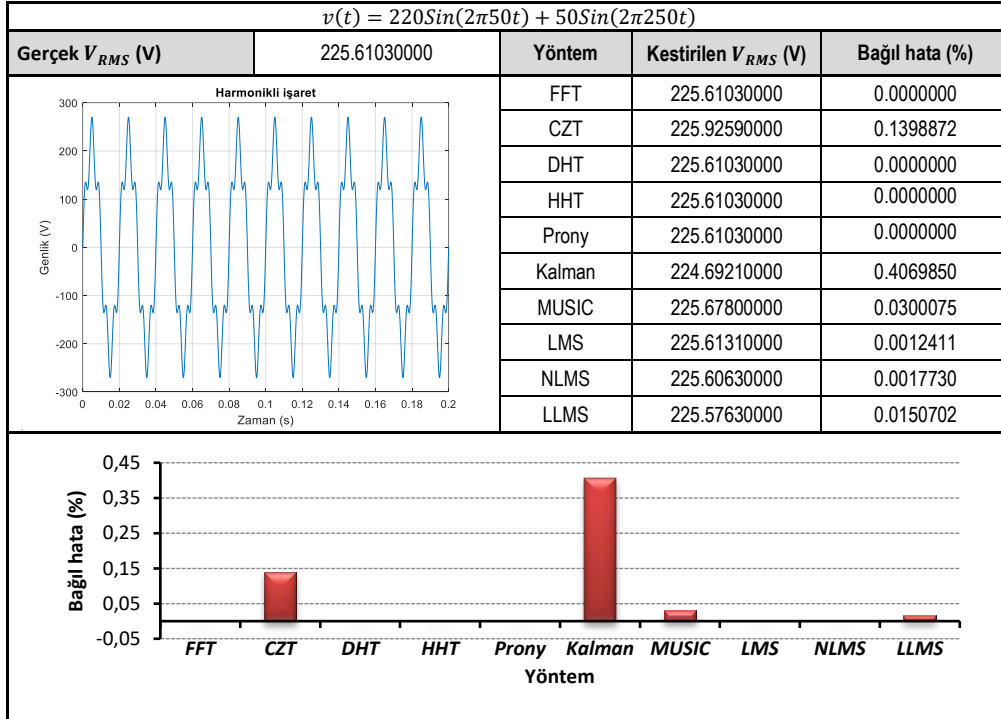
**Tablo 6. Gerilim sıçraması durumunda kestirim sonuçları**



**Tablo 7. Gerilim kesintisi durumunda kestirim sonuçları**



**Tablo 8. Harmonikli işaret için kestirim sonuçları**





## 5. SONUÇLAR

İşaretlerin temel parametrelerinin (genlik, frekans, faz) kestirimi son derece önemlidir. Bu nedenle çok sayıda kestirim yöntemi/teknikleri geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam edilmektedir. Farklı yapılarda olan bu yöntemler, işaretteki bozulmalardan da değişik oranlarda etkilenmektedirler. Gerçekleştirilen çalışmada; harmonik kestiriminde kullanılan yaygın on farklı yöntemin (hızlı Fourier dönüşümü, chirp z-dönüşümü, ayrık Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, Prony yöntemi, çoklu işaret sınıflandırma, Kalman filtre, en küçük ortalama kare, normalleştirilmiş en küçük ortalama kare, sızdıran en küçük ortalama kare) farklı bazı güç kalitesi bozulmalarında/problemlerindeki (bozulma olmaması, gerilim çökmesi, gerilim sıçraması, gerilim kesintisi, harmonik oluşması) genlik kestirim performansları incelenmiştir. Temel harmonik üzerinde oluşturulan güç kalitesi bozulmaları benzetimlerinde, yöntemlerin genlik kestirimleri ve bağlı hataları hem sayısal hem de grafiksel olarak karşılaştırmalı biçimde sunulmuştur.

## KAYNAKLAR

1. Acha, E., Madrigal, M. (2002) *Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis*, Wiley.
2. Bi, G., Zeng, Y. (2004) *Transforms and Fast Algorithms for Signal Analysis and Representations*, Birkhäuser, USA.
3. Bollen, M.H. J., Gu, I.Y.H. (2006) *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Wiley, New York.
4. Bracewell, R.N. (1984) The Fast Hartley Transform, *Proceedings of the IEEE*, 72(8), 1010-1018. doi: <https://doi.org/10.1109/PROC.1984.12968>
5. Chang, G. W., Chen, C.I. (2010) Measurement techniques for stationary and time-varying harmonics, *IEEE PES General Meeting*, Providence RI, USA, 25-29 July 2010. doi: 10.1109/PES.2010.5589611
6. Cooley, J. W., Tukey, J. W. (1965) An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of Computation*, 19(90), 297-301. doi: 10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1
7. Haykin, S. (2001) *Adaptive Filter Theory*, 4<sup>th</sup> ed., Prentice Hall.
8. Hou, H.S. (1987) The fast Hartley transform algorithm, *IEEE Transactions on Computers*, C-36(2), 147 – 156. doi: <https://doi.org/10.1109/TC.1987.1676877>
9. Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C.C., Liu, H. H. (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. doi: 10.1098/rspa.1998.0193
10. IEEE Power System Harmonics Working Group (1984) Bibliography of power system harmonics - Part I, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103 (9), 2460-2469. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318400>
11. IEEE Power System Harmonics Working Group (1984) Bibliography of power system harmonics - Part II, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103 (9), 2470-2479. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318401>

12. IEEE Std 1159-2019. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
13. Jain, S. K., Singh, S. N. (2011) Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges, *Electric Power Systems Research*, 81(9), 1754–1766. doi: 10.1016/j.epsr.2011.05.004.
14. Kalman, R. E. (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering*, 82, 35–45. doi: 10.1115/1.3662552
15. Kay, S.M. (1988) *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*, Prentice-Hall, New Jersey.
16. Kulu, M. (2020) Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim Yöntemleri ve Performans Analizleri, Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye.
17. Lei, B., Xu, G., Feng, M., Zou, Y., van der Heijden, F., de Ridder, D., Tax, D.M.J. (2017) *Classification, Parameter Estimation and State Estimation*, Wiley, GB.
18. Levy, B.C. (2008) *Principles of Signal Detection and Parameter Estimation*, Springer.
19. MathWorks (2018). MATLAB. <https://www.mathworks.com/>.
20. Mayyas, K., Aboulnasr, T. (1997) Leaky LMS algorithm: MSE analysis for Gaussian data, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 45(4), 927-934. doi:<https://doi.org/10.1109/78.564181>
21. Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. (1989) *Discrete-time Signal Processing*, Prentice-Hall, New Jersey.
22. Poularikas, A.D. (Ed.) (2010) *Transforms and Applications Handbook*, 3rd ed., CRC Press, USA.
23. Qi, L., Qian, L., Woodruff, S., Cartes, D. (2007) Prony analysis for power system transient harmonics, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007(1) doi: <https://doi.org/10.1155/2007/48406>
24. Rabiner, L.R., Schafer, R.W., Rader, C.M. (1969) The chirp z-transform, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 17(2), 86-92. doi:<https://doi.org/10.1109/TAU.1969.1162034>
25. Rilling, G., Flandrin, P., Gonvalves, P. (2003) On empirical mode decomposition and its algorithms, *IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing (NSIP '03)*, 1 June 2003, 8-11.
26. Rodrigues, N.M., Ramos, P.M., Janeiro, F.M. (2018) Comparison of harmonic estimation methods for power quality assessment, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1065 052036. doi:10.1088/1742-6596/1065/5/052036
27. Sayed, A.H. (2008) *Fundamental of Adaptive Filtering*, John Wiley & Sons, New Jersey.
28. Schmidt, R.O. (1981) A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation, Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA.
29. Singh, G. K. (2009). Power system harmonics research: a survey, *European Transactions on Electrical Power*, 19(2), 151–172. doi: 10.1002/etep.201.
30. Uyar, M (2008) Güç kalitesindeki bozulma türlerinin akıllı örüntü tanıma yaklaşımları ile belirlenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Türkiye.
31. Vatansever, F., Çengelci, B. (2011) Prony yöntemiyle harmonik analizi, *6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ/Turkey, 16-18 May,134-137.

32. Vatansever, F., Yalçın, N.A. (2016) Çevrimiçi harmonik simülatörü tasarımı, 4<sup>th</sup> *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016)*, Alanya/Antalya/Turkey, 3-5 November, 618-624.
33. Vatansever, F., Yalcin, N.A. (2018) The design of harmonic simulator based on Hartley transform, *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 21-24. doi: 10.33793/acperpro.01.01.7
34. Welch,G., Bishop, G. (2006) An introduction to the Kalman filter, Technical Report, University of North Carolina at Chapel Hill, 127-145.
35. Yalcin, N.A., Vatansever, F. (2020) Comparison of Prony and ADALINE method in inter-harmonic estimation, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(1), 405-418. doi: 10.17482/uumfd.592988

