

# ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE ZAMAN-HARMONİK ANALİZİ

**Kadir Egemen GERMEÇ, Hamit ERDEM**

Başkent Üniv., Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Böl., 06530, Bağlıca, Ankara  
[egemengermec@gmail.com](mailto:egemengermec@gmail.com), [herdem@baskent.edu.tr](mailto:herdem@baskent.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.09.2014; Kabul/Accepted: 05.12.2014)

## ÖZET

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde zamanla değişen sinyaller için temel frekans tespiti ile harmonik ve ara-harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının kestirimini kapsayan çok işlevli bir sistem yapısı geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu sistem, basit ve açık yapısından dolayı başarımı arttıracak müdahalelerle harmonik bileşenlerinin yanı sıra, bu bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini sunmaktadır. MATLAB programı ile benzetim ortamında yapılan çalışmalar, sistemin, akım ve gerilim dalga şekillerinin harmonik analizinde kullanışlı, etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bununla, zamanla değişen harmonik ve ara-harmoniklerin bireysel etkileri, zaman-harmonik uzayında gerçek zamanlı ve 3 boyutlu olarak tespit edilebilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistemlerinde gerçek zamanlı harmonik tespiti, temel frekans kestirimi, zamanla değişen harmonik ve ara harmonikler, zaman-harmonik analizi

## TIME-HARMONIC ANALYSIS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

### ABSTRACT

In this study, for time-varying signals in electric power systems, a multi functional system structure involving fundamental frequency detection, phase angle and amplitude estimation of harmonic and interharmonic components have been developed. Due to its simple and open structure, this system provides knowledge of harmonic component values as well as information about at which intervals and to what extent these component values are effective, which is possible with interventions that improve performance. The results of the experimental studies performed by using MATLAB simulation environment show that, this system is convenient and effective for the harmonic analysis of the current and voltage waveforms. Therewith, the individual effects of this time-variant harmonic and interharmonic components could be instantly detected in 3D time-harmonic space.

**Keywords:** Real time harmonic detection in power systems, time-varying harmonic and interharmonics, fundamental frequency estimation, time-harmonic analysis

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç sistemlerinde güç kalitesinin birincil ölçütü, sistemin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasıdır. Sistemin doğrusal olmayan nitelikteki elemanlarının oluşturdukları harmonikler, güç kalitesini olumsuz yönde etkilediği bilinen bir gerçektir. Elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilim şekillerini bozan etkenler harmonik olarak tanımlanmaktadır. Temel dalga dışındaki ve temel frekansın tam katlarındaki frekanslarda görülen sinüsel dalga formlu harmonikler, sistemdeki elemanlarda ek enerji kayıplarına, ısınmalara,

yalıtımlarının zorlanmasına ve hatta bazı durumlarda sistemin devre dışı kalmasına yol açarlar. Elektrik güç sistemlerinde çok sayıda doğrusal olmayan yük bulunduğu düşünülürse, ek kayıpların, harmonik bozulmuş değerlerinin yüksek seviyelere ulaşması kaçınılmazdır. Bu nedenle elektrik enerjisi iletim kaybının önlenmesi açısından harmonik seviyelerin belirlenmesi önem taşımaktadır. Diğer bir anlatımla elektrik güç sistemlerinin verimli çalışabilmesi için yükün üretebileceği tüm harmonik değerlerin doğru bir biçimde bilinmesi gereklidir. Bu da ancak gelişmiş harmonik belirleme yöntemleri ile mümkündür [1-2]. Uygulamada harmoniklerin genlik ve faz açılarının

kestirimi için birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan Kesikli Fourier Dönüşümü (KFD) en çok tercih edilen frekans uzayı sinyal analiz yöntemlerinden biridir [3]. Ancak bu periyodik yöntemde örtüşme, sızıntı gibi olumsuz etkiler gürültü miktarını artırmaktadır [4]. Bu nedenlerle bu yöntemler, sinyalin gürültü içermesi durumunda tercih edilmemektedirler [5]. Diğer yandan, yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek açısından orijinal dalga formu ile harmoniklerin fazı arasındaki doğrusal olmayan bağlantıyı çözmek gerekmektedir. Bu tür durumlarda harmonik kestirimi için Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılabilir. Yapısal kolaylıklarına rağmen YSA'nın, ağırlık atamalarına bağlı olarak zamansız yakınsaması gibi nedenlerle başarımının değişebilmesi ve yakınsama hızlarının düşük olması gibi dezavantajları vardır [6-11]. Zamanla değişen sinyaller söz konusu olduğunda, öz-yenilemeli dinamik analiz yöntemleri basit yapılarından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerdendir [12]. Ancak bu yöntemlerin, sinyalin gürültü ve ara-harmonik gibi bileşenler içerdiği durumlarda ön-filtreleme gibi işlemlerin getirdiği ek hesap yükü ve nümerik kararsızlık gibi eksikleri de bulunmaktadır [6]. Harmonik bileşenlerin kestirimi için sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri de Uyarlamalı Doğrusal Eleman (ADALINE) yöntemidir [7]. Yapılan son çalışmalarda Dash ve arkadaşları tarafından ADALINE benzeri, ancak harmonik bileşenlerin yanı sıra temel frekans değişimini kestirebilen bir yapı geliştirilmiştir [12]. Bu yapıda ara harmonik kestirimi yapılmazken, diğer bileşenlerin kestirimi için Hessian Matrisi kullanılarak işleme ikinci türev de dahil edilerek harmonik kestirimi yapılmıştır. Ancak ikinci türevden dolayı artan işlem maliyeti ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak için varsayımlar eklenmiştir. Ayrıca bu yöntemler, temelde kapalı bir yapıya sahiptir ve anlık değil, belli bir zaman aralığındaki sinyal değerlerini işlemektedir.

Bu çalışmada ise harmonik güncelleme yöntemi olarak, ortalama karesel hatanın en aza indirgenmesi esasına dayalı, ağırlık ayarlama işlevinin kullanıldığı açık bir sistem yapısı geliştirilmiştir. Tüm harmonik parametrelerine müdahale edilebilir nitelikteki bu sistem, anlık sinyal değerlerini gerçek zamanlı olarak işleyebilmektedir. Ayrıca, sistemin harmonik kestirim işlevine ara harmonik ve temel frekans kestirim işlemleri de ilave edilmiştir. Yapılan çalışmada, bu harmonik bileşenlerinin kestirim işlevleri geliştirilerek ve her bileşeni görselleştirerek, uyarlanabilir yapının etkinliği artırılmıştır.

Çalışmada geliştirilen yapı, temel olarak bir ana ve bir alt sistemden oluşmaktadır. Bu sistemle ilk aşamada harmonik bileşenler hesaplanmakta, ikinci aşamada ise bu değerler üzerinden temel frekans kestirilmektedir. Böylece temel bileşenleri ve temel frekans zamana göre değişen elektrik sinyali anında izlenebilmekte ve sonuçlar 3 boyutlu ortamda gözlenebilmektedir. Bu çözümlenmeyle hangi

harmoninin hangi anda ve hangi değerde etkin olduğu incelenebilmektedir. Sistem çözümlenmesi çalışmanın 2. Bölümünde anlatılmıştır. 3. Bölümde ise sistemin başarısı benzetim ortamında test edilmiştir. Elde edilen neticeler "Sonuçlar ve Değerlendirme" bölümünde açıklanmıştır.

## 2. SİSTEM YAPISI (SYSTEM STRUCTURE)

Güç sistemlerinde karşılaşılan voltaj ya da akımların dalga formülü, bilinen güç sistem frekansı için bilinmeyen genlik ve faz açılara sahip harmonik bileşenlerin doğrusal toplamı olarak açıklanabilir. Varsayalım ki temel açısal frekansındaki güç sistemi  $\omega$ , genlik ve faz değerleri bilinmeyen harmonikler ( $\omega_k = k\omega$ ) tarafından bozulmuş olsun. Bu durumda sinyalin dalga şeklinin genel Fourier seri açılımı aşağıdaki gibidir [13-16]:

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} G_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (1)$$

Burada sinyalin DC bileşeni  $D_0$ ,  $k$ 'nci harmoniğin genliği  $G_k$ , fazı ise  $\phi_k$  ile ifade edilmektedir. Bu sinyalin büyük dizinli harmonikleri dikkate alınmayipilk  $K$  harmoniği göz önünde tutulduğunda bu ifade aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K G_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (2)$$

Burada,  $A_k$  ve  $B_k$  bileşenleri  $k$ 'nci harmoniğinin genliğini ve fazını oluşturmaktadırlar:

$$A_k = G_k \cos(\phi_k) \text{ ve } B_k = G_k \sin(\phi_k) \quad (3)$$

$$G_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \text{ ve } \phi_k = \arctan(B_k / A_k) \quad (4)$$

Bu dönüşümler ile denklemin amacımıza uygun diğer bir biçimi ise aşağıdaki gibidir:

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (5)$$

Bir diğer yandan, yukarıdaki sinyal vektörel bir ifadeyle,

$$y = Wx + b \quad (6)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu bilgiler ışığında, zamanın işlevi olan sinüs ve kosinüs temel bileşenlerini ağımızın giriş elemanları olarak seçtiğimiz takdirde,

$$x = [\sin(\omega t) \quad \cos(\omega t) \quad \sin(2\omega t) \quad \cos(2\omega t) \dots \cos(K\omega t)] \quad (7)$$

$$W = [A_1 \quad B_1 \quad A_2 \quad B_2 \quad \dots \quad A_K \quad B_K]^T \quad (8)$$

ve DC bileşene karşılık gelen bias değeri  $b = D_0$  alındığında, modelimizin çıkışı,

$$y(t) = \sum_{k=1}^K Wx(t) + b = Wx + b \quad (9)$$

şeklinde olacaktır.

Bu çalışmada, ilgilenilen harmonik değerlerinin ağırlıklarda saklı olması gerçeğinden hareketle ağırlık değerleri,  $t_n$  anındaki istenen sinyal  $s(t_n)$  ile ağırlık çıkışı  $y(t_n)$  arasındaki hata  $e(t_n)$  olarak tanımlanan farkın, en aza indirgenmesi ile güncellenmektedir [14, 17-20]. Örneğin, özel bir  $t_n = \Delta t.n$  anında çıkışta beklenen değer  $s(n)$  olsun, bu an için ağırlık çıkışı  $y(n)$  ile gösterelim. Bu durumda bu iki değer arasındaki fark, diğer bir deyişle  $n$ 'inci tekrardaki hata  $n = 1,2,3..N$  için,

$$e(n) = s(n) - y(n) \quad (10)$$

olacaktır. Bu durumda, sinyalin temel açısal frekansı  $\omega_k$  bilinir ve zaman değerleri sabitken,  $n$ 'inci tekrardaki ortalama karesel hata,

$$E(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^2(n) \quad (11)$$

şeklinde olacaktır. Bu yaklaşımla,  $\eta$  integral sabiti ve  $\nabla E$  de  $E$ 'nin gradienti iken, ilgilenilen işlev için en elverişli nokta durağan çözüm şeklindedir (denklem 12). Bu varsayıma göre, hata fonksiyonunun türevi, ilk aşamada frekans sabit kabul edilerek, ağırlıklara, ikinci aşamada ise diğer bileşenler sabit kabul edilerek, frekansa göre alınabilir (denklem 14, 20).

$$dW / dt = -\eta \nabla E \quad (12)$$

Ağırlıkların değeri,  $t_n$  anında bu yöntemle güncellenmekte ve bu durumda  $i$ 'inci ağırlıkta,  $n$ 'inci tekrarda,  $t_n$  anı için yapılan iyileştirme,

$$\Delta w_i(n) = -\eta \nabla_{w_i} E(n) \quad (13)$$

şeklinde olmaktadır.

Burada,  $\eta$  öğrenme katsayısı olarak adlandırılan pozitif bir gerçel sayıdır. Bu durumda, ağda ağırlık ayarlaması, geri besleme yöntemi ile  $\eta$ 'ye bağlı olarak  $i = 1,2,3,..,l$ ,  $n = 1,2,3,..,N$  ve  $0 < \eta < 1$  için, aşağıdaki gibi yapılır:

$$\Delta w_i(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_i} = \eta e(n) x_i(n) \quad (14)$$

Böylece,  $i$ 'inci ağırlık ve bias'ın,  $n+1$ 'inci tekrardaki değeri aşağıdaki gibidir:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \Delta w_i(n) = w_i(n) + \eta e(n) x_i(n) \quad (15)$$

Bu durumda, ağırlık ileri besleyerek elde edilen çıkış değeri ile istenilen değer arasındaki hatayı geri yönde besleyerek, ağırlıklara karşılık gelen harmonik değerlerinin güncellenmesi işlemi de aşağıdaki şekilde olmaktadır:

$$b(n+1) = b(n) + \eta e(n) \quad (16)$$

$$A_k(n+1) = A_k(n) + \eta e(n) \sin(k\omega n \Delta t) \quad (17)$$

$$B_k(n+1) = B_k(n) + \eta e(n) \cos(k\omega n \Delta t) \quad (18)$$

Diğer yandan temel frekansın değiştiği durumda, en küçük kareler bazında hatayı en-azlama yöntemi kullanılmıştır. Bu hata  $n$ . iterasyon için,

$$E(n) = \frac{1}{2} e^2(n) = \frac{1}{2} \left( s(n) - \left[ D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \cos(k\omega t) \right] \right)^2 \quad (19)$$

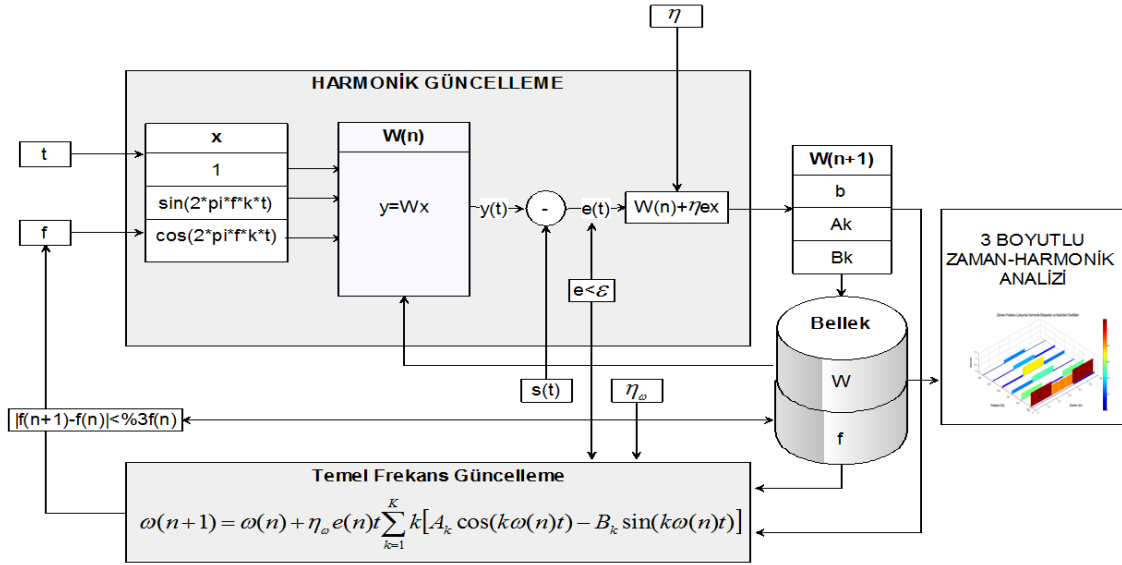
şeklinde olacaktır. Bu durumda  $t_n = \Delta t.n$  anı için temel frekansta yapılan güncelleme,

$$\Delta \alpha(n) = -\eta \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( s(n) - y(n) \right) \left( -\sum_{k=1}^K (A_k \cos(k\alpha t) - B_k \sin(k\alpha t)) \right) \quad (20)$$

şeklindedir, bu durumda temel frekans güncelleme işlemi aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

$$\alpha(n+1) = \alpha(n) + \eta \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( s(n) - y(n) \right) \left( -\sum_{k=1}^K (A_k \cos(k\alpha(n)\Delta t) - B_k \sin(k\alpha(n)\Delta t)) \right) \quad (21)$$

Girişlerin Fourier temel bileşenleri olarak seçilmesi ile giriş ve çıkış arası ilişkiyi temel bir doğrusal denkleme dönüştüren bu en uygun duruma getirme problemi, FADALINE (Fourier ADaptive LINEar Element) yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir [14]. Ancak, bu doğrusal cebir problemi başka birden çok yöntemle çözülebilmektedir [6]. FADALINE tek bir sinir hücresinden oluşan basit yapısı nedeniyle tercih edilebilir özellikle olsa da kapalı bir yapıya sahiptir. Bu yöntemin yukarıda belirtilen güncelleme işlemleri kullanılarak geliştirilen sistem, yapılan tüm işlemlerin görülebildiği, hesapsal karmaşıklık içermeyen, açık ve basit bir yapıya dönüştürülmüştür. Aşağıda Şekil 1'de gösterilen sistem, bir ana ve buna paralel çalışabilen bir alt düzenekten oluşmaktadır. Ana sistem, sinyal girişini takiben anlık sinyal değerlerini gerçek zamanda işleyerek ortalama karesel hatanın en-küçüklenmesi yöntemi ile harmonik değerlerini döngüsel bir şekilde güncellemektedir. Alt sistem ise istenilen an veya periyotlarda ana sisteme temel frekans bilgisini sağlamaktadır. Buna ek olarak sistem, başarımı artırıcı yönde kullanıcının seçeneklerine uygun koşul-karar süreçlerini kapsayan uyarlamalı işlemler ile harmonik değerlerinin zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu olarak görüntülenmesi işlevini de yerine getirmektedir. Bu yapıya uygun olarak MATLAB programı yardımıyla gerçekleştirilen sistemin temel çalışma adımları aşağıda özetlenmiştir:



ANA SİSTEM		
<b>START</b>		
<b>1. ASSIGN:</b>		bk. 2.1
1.1.	İlgilenilen harmonik sayısı değerini ata	$\{ \text{DC bileşen } 0,6. 1. 3. 5. 7. 9. 11. \text{ harmonikler için} \}, I=8 \}$
1.2.	Güncelleme katsayısı değerini ata	$\{ \eta = 0,78 \}$
<b>2. INIT:</b>		bk. 2.1
2.1	Harmonik bileşen değerlerini ilk değerle	$\{ W = \text{zeros}(I,I) \}$
2.2	Temel frekans değerini ilk değerle	$\{ f(0) = 50 \}$
2.3	Zamanı başlat	$\{ n = 0 \}$
<b>3. WHILE</b> (sistem kapatılana dek sinyal geldikçe)		$\{ N: \text{ zamanla değişen bileşik sinyal uzunluğu iken, FOR}(n=0: \Delta t: N) \}$
<b>3.1 READ:</b>		
3.1.1	Giriş sinyalini anlık değerini oku	$\{ s(n) \}$
<b>3.2 GET:</b>		
3.2.1	Harmonik bileşen değerlerini al	$\{ W(n) \}$
3.2.2	Anlık temel frekans değerini al	$\{ f(n) \}$
<b>3.3 SET:</b>		
3.3.1	Çarpım giriş vektörünü oluştur	$\{ x(n) = [1 \sin(2\pi f n \Delta t) \cos(2\pi f n \Delta t) \dots \sin(k2\pi f n \Delta t) \cos(k2\pi f n \Delta t) \dots] \}$
<b>3.4 COMPUTE:</b>		bk. 2.2
3.4.1	Anlık sinyalin kestirilen değerini hesapla	$\{ y(n) = W(n)x(n) \}$
3.4.2	Sistemin anlık hata değerini hesapla	$\{ e(n) = s(n) - y(n) \}$
3.4.3	Harmonik değerlerini hesapla (ve alt sisteme gönder)	$\{ W(n) = W(n-1) + \eta e(n-1)x(n-1) \}$
<b>3.5. IF</b> (Sistem hatası > Hata tolerans değeri)		$\{ IF(e(n) > \epsilon) \}$
<b>THEN</b>	Alt sisteme veri gönder ve 3.4'e dön	$\{ [n\Delta t \ W(n) \ e(n)] \}$
<b>ELSE</b>	Harmonik bileşen değerlerini belleğe gönder ve 3.6'ya devam et	$\{ MEMORY = [MEMORY \ W(n) \ f(n)] \}$
<b>ENDIF</b>		
<b>3.6 INCREMENT:</b>		
3.6.1	Zamanı artır ve 3.1'e dön	$\{ n = n + 1 \}$
<b>ENDWHILE</b>		
<b>4. DISPLAY</b>		
4.1	Bellekteki harmonik bileşen değerlerini zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu görüntüle	bk. 2.3; $\{ \text{mesh}(MEMORY) \}$
<b>END</b>		
ALT SİSTEM		
<b>START</b>		
<b>1. ASSIGN:</b>		
1.1	Temel frekans güncelleme katsayısı değerini ata	$\{ \eta_{\omega} = 0,54 \}$
<b>2. WHILE</b> (ana sistemden veri geldiği sürece)		
<b>2.1. READ:</b>		
2.1.1	Zamanı al	$\{ n\Delta t \}$
2.1.2	Harmonik bileşen değerlerini al	$\{ W(n) \}$
2.1.3	Sistemin hatasını al	$\{ e(n) \}$
<b>2.2. COMPUTE:</b>		bk. 2.2
2.2.1	Temel frekans güncelle	$\{ f(n+1) = f(n) + \eta_{\omega} e(n) n \Delta t \sum_{k=1}^K k [A_k \cos(k\omega(n)n\Delta t) - B_k \sin(k\omega(n)n\Delta t)] / 2\pi \}$
<b>2.3. IF</b> (Temel frekans farkı %3'ten büyükse)		
$\{ f(n+1) - f(n) > 0,03 f(n) \}$	<b>THEN</b> Ana sisteme yeni frekans bilgisini gönder	
<b>ENDIF</b>		

## 2.1. Başlangıç Koşulları ve İlk-Değer Atama (Initial Conditions and Initialization)

Harmonik değerleri ve öğrenme katsayılarını içeren her bir parametrenin ilk değerlendirme işlemi, sistemin başarımını doğruluk ve hız açısından yüksek oranda etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Bu işlem, sistemin ön-işletimi sonrası yapılabileceği gibi, rastgele, deneme yanılma ile ya da kullanıcı tercihli ön bilgiler kullanılarak da yapılabilmektedir. Bütün bunlara ek olarak sistem, belli bir ön-zaman aralığında işletilip, bu değerler harmoniklerin ilk değerlendirilmesinde kullanılabilir.

## 2.2. Sistem İşletimi, Hesaplamalar ve Hataya Bağlı Güncellemeler (System Execution, Computations and Error Based Update)

Sistem işletimi, belirlenen parametrelere bağlı olarak sistem çıkışının hesaplanması ve daha sonra bu çıkışı, sinyalin o anki gerçek değeriyle karşılaştırıp; bulunan farkın hata olarak tespit edilmesi ve bu yolla sistem parametrelerinin güncellenmesi aşamalarını içermektedir. Harmonik bileşenlerin güncellenmesi, ortalama karesel hatanın en-azlanması ilkesine dayanarak sistem tarafından otomatik olarak yapılmaktayken, temel frekans ve güncelleme katsayısı gibi diğer parametre değerleri de saptanan hatanın belli bir tolerans değerini geçmesi durumunda tercihen güncellenebilmektedir.

Bunların dışında, elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan sinyallerin genlik ve faz açıları ile birlikte temel frekanslarının da durağan olmayıp zamanla değişmelerinden dolayı, harmonik analiz yöntemlerinde öncül olarak güç sistem frekansı ile kestirimde kullanılan yöntemin temel frekansı arası senkronizasyona gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle güç sistemlerinde IEC 61000-4-7 [21] standardına göre, 48 ila 52 Hz. aralığında değişebilen temel frekans değerleri göz önüne alınarak, bu değişimi izlemek üzere sistemimize paralel olarak çalışabilen uyarlamalı bir temel frekans kestirim aşaması eklenmiştir.

Bu işlem, yine kullanıcı seçimine bağlı olarak istenilen zamanda veya belli periyodlarla yapılabildiği gibi, koşul-karar işlemiyle sistem hatasının belli bir değerin üstüne çıktığı durumlarda da yapılabilmektedir.

Diğer yandan elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin yanında gözlemlenen alt ve ara harmoniklerin de yakalanabilmesinin sistem başarımı açısından büyük avantajları bulunmaktadır. Bu sistemde alt ve ara harmonik kestirimi için tercihen iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan birincisi, harmoniklerin belirlenip bu bileşenlerin etkileri sinyalden süzülükten sonra ara ve alt

harmonik bileşenler için kestirim işlemine devam edilebildiği çift aşamalı bir yöntemdir. İkincisi ise, temel frekans değeri yerine IEC 61000-4-7 [21] standardına göre 5 Hz olarak belirlenen frekans çözünürlüğü değeri olarak alınan bir referans frekansı kullanılıp, bu frekansın tam katlarındaki ara harmonik ve harmonik bileşenlerin kestirimi işlemi yapılmaktadır.

İkinci yöntem gerçek zamanlı sonuçlar vermesi açısından daha tercih edilir olsa da frekans çözünürlüğünün tam katları olmayan ara harmoniklerin tespitinde yetersiz olabilmektedir.

## 2.3. Tekrarlı Hesaplamalar, İyileştirmeler ve Sonuçların Görüntülenmesi (Repetitive Computations, Improvements and Displaying the Results)

Sistemin dinamik olması, bir karar mekanizmasının gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Daha önceden saptanmış sonlandırma koşulları sağlanana kadar sistem döngüsel olarak çalışmaya devam ederek, gerçek zamanlı sonuçlar vermektedir. Bu tekrarlı hesaplamalar, amaç doğrultusunda en iyinin bulunmasına yönelik koşullara bağlı seçimler, sistemin yeniden oluşturulması, yeniden hesaplamalar, yenilemeler ve belirlediğimiz yeterlilik veya sonlandırma koşullarına bağlı olarak alınan kararları ve iyileştirmeleri içermektedir.

Sistemde güncelleme işlemi devam ederken, çıkışta elde edilen harmoniklerin genlik ve faz açıları gibi sistem parametreleri bellekte tutularak, istenilen anda bu sonuçların zamanla değişimleri, zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu olarak görüntülenebilmektedir.

## 3. BENZETİM ÇALIŞMASI VE SONUÇLAR (SIMULATION STUDY AND RESULTS)

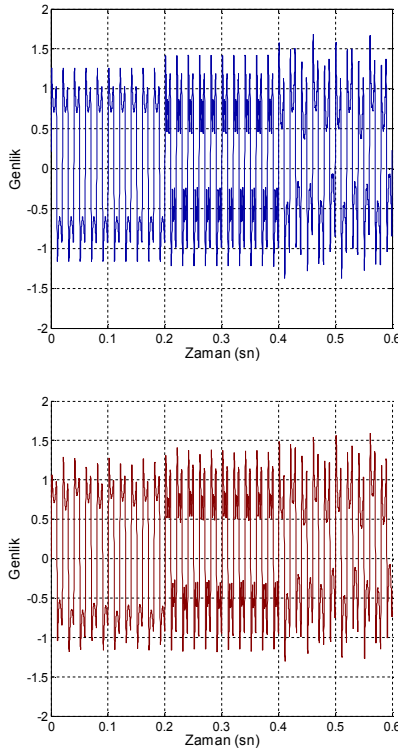
Sistemin başarımını değerlendirmek açısından, MATLAB programı kullanılarak benzetim ortamına uyarlamak suretiyle bir test sinyal oluşturulmuştur. Tablo 1'de görüldüğü gibi bu sinyalin, zamanla değişen karakteristiğini belirtmek için,  $[0 - 0,2)$ ,  $[0,2 - 0,4)$  ve  $[0,4 - 0,6)$  olmak üzere üç zaman aralığı seçilmiştir. Sistem, sıfır frekans (DC) değeri ve 1., 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları ( $G_1; F_1, G_3; F_3, G_5; F_5, G_7; F_7, G_9; F_9, G_{11}; F_{11}$ ) eklenerek modellenmiştir.

Buna ek olarak üçüncü zaman aralığına 30 Hz frekans değerinde bir alt harmonik bileşen ilave edilmiştir. Bu değerler Tablo 1'de örnek sinyal kısmında gösterilmiştir. Modellemede, öngörülen üç zaman aralığında, sinyalin temel frekans değerleri sırasıyla 49,78; 49,92 ve 50 Hz olarak alınmış ve ayrıca sinyale, 20, 10 ve 5 dB değerlerinde 3 farklı oranda gürültü (beyaz Gauss gürültüsü) eklenmiştir.

**Tablo 1.** DC ve harmonik bileşen değerleri: Örnek Sinyal, Kestirilen Değerler ve Ortalama Karesel Hata(The values of DC and harmonic components: The sample signal, Estimated values and Mean Square Error)

Zaman (sn)	DC (V)	$G_1; F_1$ (V; °)	$G_3; F_3$ (V; °)	$G_5; F_5$ (V; °)	$G_7; F_7$ (V; °)	$G_9; F_9$ (V; °)	$G_{11}; F_{11}$ (V; °)	$G_{0,6}; F_{0,6}$ (V; °)
<b>Örnek Sinyal</b>								
[0 - 0,2]	0,05	1,38	0,5;29	0,25;15	0,13;8	0,06;-5	0,03;-18	-
[0,2-0,4]	0,1	0,9;32	0,54;23	0,43;10	0,1;-8	0,03;-16	0,15;-25	-
[0,4-0,6]	0,15	0,8;27	0,58;17	0,32;4	0,19;-15	0,13;-24	0,02;-30	0,2;15
<b>Kestirilen Değerler</b>								
0,2	0,049	0,99;37,65	0,49;28,5	0,25;14,6	0,13;7,73	0,06;-5,03	0,03;-17,71	-
0,4	0,099	0,89;31,73	0,54;22,7	0,43;9,86	0,09;-8,12	0,03;-15,83	0,15;-25,24	-
0,6	0,148	0,81;26,62	0,58;16,7	0,32;3,89	0,19;-14,92	0,13;-23,88	0,02;-30,05	0,19;14,63
<b>Ortalama Karesel Hata</b>								
[0 - 0,2] aralığı için:0,0072			[0,2 - 0,4] aralığı için:0,0014			[0,4 - 0,6] aralığı için:0,0019		

Şekil 2’de ise uygulanan ve kestirilen sinyal dalga şekilleri görülmektedir.



**Şekil 2.** Örnek giriş sinyali ve kestirilen sinyal (Sample input signal and estimated signal)

### 3.1. Harmonik ve Alt Harmonik Bileşenlerin Genlik ve Faz Açılarının Kestirilmesi (Estimation of Amplitude and Phase Angles of the Harmonic and Interharmonic Components)

Harmonik parametrelerini kestirmek için yukarıdaki Tablo 1’de örnek sinyal değerleri kullanılmış ve elde edilen harmonik bileşenlerinin kestirilen değerleri bu tablonun ikinci bölümünde gösterilmiştir. Ayrıca, aynı tablonun en alt kısmında uygulanan sinyalin her zaman aralığında ortalama karesel hata değeri verilmiştir. Burada en düşük ortalama karesel hata

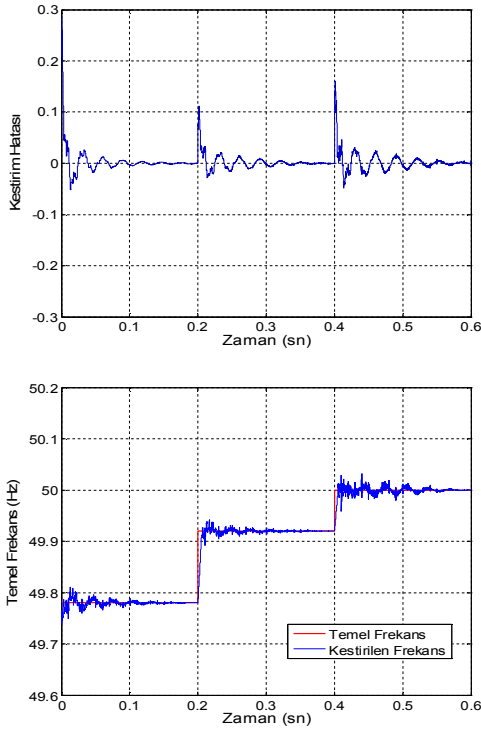
değeri 0,0014’dür ve bu değer 2. zaman aralığında bulunmaktadır. 30 Hz frekansta belirlenen ve genliği 0,2, faz açısı 15 derece olan, alt harmoniği de kapsayan 3. zaman aralığında ise bu bileşenler 0,0019 hata ile kestirilmiştir. Bu çalışmada, öncelikle harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi frekanslarda ortaya çıktığı tespit edilmiş, daha sonra bu bileşenlerin genlik ve faz açısı değerleri kestirilmiştir.

Çalışmada, ulaşılmak istenen etkinlik, kestirilen değerlerin gerçek değerlerine yakınsayıp, sistemin belli bir nümerik kararlılığa ulaşması ile ifade edilebilmektedir. Burada kastedilen yöntemin hızı, istenilen doğruluğa yakınsama hızıdır. Diğer bir deyişle, hatanın ne kadar zamanda belirlenen toleransın değerinin altına düşüp, sistemin kaç periyotda kararlı hale geldiği önem taşımaktadır. IEC 61000-4-7 [21] standardına göre bu zaman, 10 periyotluk zaman dilimine karşılık gelen 0,2 sn dir. Uygulanan sinyale göre seçilen hata tolerans değerine göre değişebilmekle birlikte sistem, yaklaşık olarak 6 periyotluk zaman diliminde kararlı duruma gelmektedir. Ancak, sistem parametrelerinin ilk-değerlenmesi ve güncelleme katsayılarının ayarlanması işlemlerine bağlı olarak, nümerik kararlılık ve yakınsama hızında büyük değişimler gözlemlenebilmektedir.

Burada, dikkat edilmesi gereken bir başka husus da bir sonraki döngüye kadar güncelleme işleminin yapıp yapılmadığını ifade eden güncelleme zamanıdır. Uyarlandığı ortama göre parametrelerin seçilebilir olmasından hareketle çalışmada, örnekleme periyodu, güncelleme zamanından büyük herhangi bir değerde seçilerek bu problemten kaçınılmaktadır.

Bilindiği üzere zaman-harmonik analizinde, zamanla değişen sinyal parametrelerinin değişim anlarının tespiti önem taşımaktadır. Bu değişim anlarında ortalama karesel hata değeri belirlenen tolerans değerinin üstüne çıkarak bu değişimi haber

vermektedir. Şekil 3'teki sonuçlar incelendiğinde, harmonik bileşen değerlerinin değiştiği geçiş anlarından itibaren (0,2 ve 0,4 üncü saniyeler) bu hata değeri, bir süre, tanımlanan tolerans seviyesinin üzerine çıkmaktadır. Bu anlamda tespit edilen bu geçiş anlarında sistem, döngü sayısını arttırmak suretiyle daha hızlı bir şekilde kararlı duruma getirilebilmektedir. Böylece yüksek gürültülü ortamlarda bile, sistem hatasında dikkate değer azalma görülerek, harmonik bileşen değerleri daha yüksek bir doğrulukla yakalanabilmektedir.



**Şekil 3.** Sistem kestirim hatası ve Temel Frekans kestirimi (System estimation error and Estimation of fundamental frequency)

### 3.2. Temel Frekansın Kestirilmesi ve İzlenmesi (Estimation and Tracking the Fundamental Frequency)

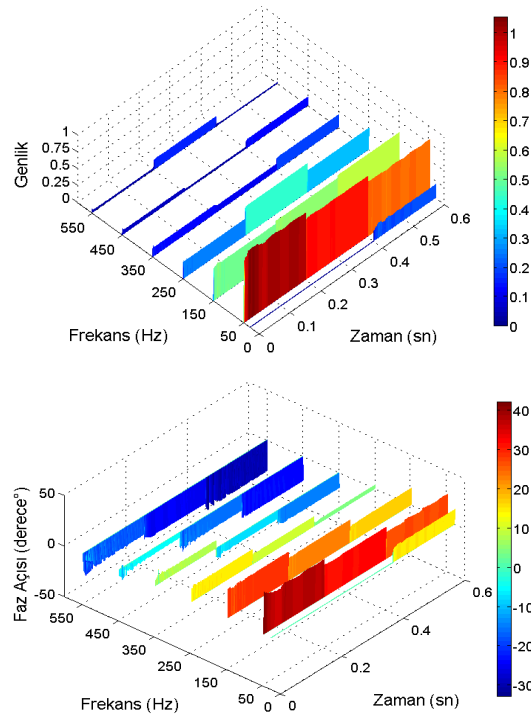
Benzetim çalışmasında örnek alınan sinyal, üç aralıkta üç farklı temel frekans değerine sahiptir. Çalışmada önce harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarını kestirerek, bu değerler üzerinden temel frekans kestirim işlemi gerçekleştirilmektedir. Sistemde bu işlem, örnek sinyal ile kestirilen sinyal değerleri arasındaki hata değerinin belli bir zaman aralığında belirlenen hata tolerans seviyesinin üstüne çıkması durumunda gerçekleştirilmektedir. Aksi halde ise uygulamada mevcut frekans, temel frekans kabul edilerek bir sonraki döngüye geçilmekte ve harmonik güncelleme işlemine devam edilmektedir.

Şekil 3'de uygulanan giriş sinyal ile kestirilen sinyal arasındaki hata değerleri görülmektedir. Burada sistem hatası, temel frekansın değiştiği geçiş anlarında kısa bir süre için yüksek değerlere çıkmaktadır.

Sistemin temel frekans değeri, zamanla değişen sinyal parametrelerinin bu değişim anlarında, sisteme eklenmiş frekans kestirim aşaması ile güncellenmektedir.

Geliştirilen sistemde, IEC 61000-4-7 [21] standardına uygun olarak, temel frekans güncellemesi önceki ve sonraki temel frekans değerleri arasındaki farkın, önceki temel frekans değerinin %3'ünden büyük olduğu durumlarda yapılmaktadır [6]. Çalışmada, temel frekans değişimi her üç zaman aralığında yaklaşık olarak 6 periyotluk zaman diliminde yakalanmaktadır.

### 3.3. Sonuçların Üç Boyutlu Zaman-Harmonik Uzayında Görselleştirilmesi (Visualization of the Results in 3-D Time Harmonic Space)



**Şekil 4.** Kestirilen harmonik ve alt harmoniklerin 3 boyutlu gösterimi a) genlik – frekans - zaman, b) Faz açısı - frekans - zaman (3-D illustration of the estimated harmonic and interharmonic a) Amplitude - frequency - time b) Phase angle - frequency - time)

Çalışmada geliştirilen sistemin harmonik parametrelerinin anlık olarak izlenebilmesi ve görselleştirilmesi işlevi, Şekil 4'te görüldüğü gibi MATLAB'ın görsel desteği kullanılarak 3 boyutlu olarak (genlik - frekans - zaman, faz - açısı - frekans - zaman) görüntülenebilir sağlanmaktadır.

Sistem, harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini sunarak, bu bileşenlerin zaman yörüngelerindeki bireysel etkilerinin 3 boyutlu zaman-harmonik uzayında izlenmesi suretiyle kullanılan çözümlene yönteminin etkinliği

artırılmaktadır. Bu anlamda olası yük değişimlerinden dolayı değişen harmonik genlik değerleri ve ilgili faz açıları izlenebilecek, böylelikle hangi harmoniğin ne zaman ve ne oranda etkin olduğu anında tespit edilerek bu bileşenlerin verdiği zararlar asgariye indirilebilecektir.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSION)

Bu çalışmada, güç sistemlerinde, harmonik bileşenlerini kestirmek ve frekans değişimini izlemek için uyarlanabilir iki aşamalı bir sistem geliştirildi. Sistemde, ADALINE yöntemi ve Fourier serisinin özellikleri temel alınarak genlik, faz açısı, ara harmonik ve frekans kestirimi yapabilen bir sistem yapısı sunuldu. Geliştirilen yöntemin başarımı, benzetim ortamında, gürültülü ve harmonik bileşenler içeren bir sinyal uygulanarak test edildi. Kesitirilen genlik ve faz açısı değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde hesaplandı. Ayrıca, harmonikli sinyaldeki temel frekans değişiminin yaklaşık 6 periyotluk sürede tespit edilebileceği gözlemlendi. Kesitirilen harmonik bileşenleri görselleştirilerek üç boyutlu harmonik-zaman çözümlenmesi yapıldı. Geliştirilen sistem PC üzerinde, nesne yönelimli programlar kullanılarak ve kullanıcı arayüzü eklenerek, gerçek güç sistemlerin izlenmesinde kullanılabilir. PC kullanılmadan ise sistem, DSP destekli devre veya FPGA tabanlı devre kullanılarak gerçekleştirilebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Arrillaga, J. ve Watson N.R., **Power System Harmonics**, Wiley, New York, A.B.D., 2003.
2. Grady, W.M. ve Santoso, S., “Understanding Power System Harmonics”, **IEEE Power Engineering Review**, Cilt 21, No 11, 8–11, 2001.
3. Chang, Y.N., Hsieh, Y.C. ve Moo, C.S., “Truncation Effects of FFT on Estimation of Dynamic Harmonics On Power System”, **International Conference on Power System Technology**, Perth, Avustralya, 1155–1160, 04-07 Aralık 2000.
4. Girgis, A.A. ve Ham, F.M., “A Quantitative Study of Pitfalls in FFT”, **IEEE Transaction on Aerospace Electron Systems**, Cilt 16, No 4, 434–439, 1980.
5. Moravej, Z. ve Enayati, J., “A Hybrid Least Squares-Clonal Selection Based Algorithm for Harmonics Estimation”, **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Cilt 24, No 1, 1-15, 2014.
6. Chen, C.I. ve Chen, Y.C., “Comparative Study of Harmonic and Interharmonic Estimation Methods for Stationary and Time-Varying Signals”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Cilt 61, No 1, 397-404, 2014.
7. Dash, P.K., Swain, D.P., Routray, A. ve Liew, A.C., “Harmonic Estimation in a Power System Using Adaptive Perceptrons”, **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Cilt 143, No 6, 565–574, 1996.
8. Joorabian, M., Mortazavi, S.S. ve Khayyami, A.A., “Harmonic Estimation in a Power System Using a Novel Hybrid Least Squares–Adaline Algorithm”, **Electric Power Systems Research**, Cilt 79, No 1, 107–116, 2009.
9. Fang, C. ve Mu, C., “An Embedded Inter-Harmonics Estimation Algorithm Based on Special Approximate ARMA Model”, **International Conference on Computer Science and Software Engineering**, Wuhan, Çin, 158–161, 12-14 Aralık 2008.
10. Rodriguez, M., Troncoso, R., “Detection and Classification of Single and Combined Power Quality Disturbances Using Neural Networks”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Cilt 61, No 5, 2473-2482, Mayıs 2014.
11. Chang, G.W., Chen, C. ve Teng, Y.F., “Radial-Basis-Function-Based Neural Network for Harmonic Detection”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Cilt 57, No 6, 2171-2179, 2010.
12. Dash, P.K., Nanda, S. ve Biswal, M., “Estimation of Time Varying Signal Parameters Using an Improved Adaline Learning Algorithm”, **International Journal of Electronics and Communications (AEU)**, Cilt 68, No 2, 115-129, Ocak 2014.
13. Lombardi, M.A., “Fundamentals of Time and Frequency”, **The Mechatronics Handbook**, Editör: Bishop R.H., CRC Press, Florida, A.B.D., 2002.
14. Germeç, K.E., “Fourier Yapay Sınır Ağları ile Gerçek Zamanlı Harmonik Analizi”, **17th Signal Processing and Communications Applications Conference**, Antalya, Türkiye, 333-336, 9-11 Nisan 2009.
15. Tartan, E.Ö. ve Erdem, H., “Harmonik Kestirimi İçin En Küçük Kareler-Farksal Evrim Tabanlı Hibrit Bir Algoritma”, **20th Signal Processing and Communications Applications Conference**, Muğla, Türkiye, 1-4 Nisan 2012.
16. Demirbaş, Ş. ve Bayhan, S., “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Analizi”, **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 3, 461-468, 2009.
17. Osowski, S., “Neural Network for Estimation of Harmonic Components in a Power System”, **IEE Proceedings-C (Generation, Transmission and Distribution)**, Cilt 139, No 2, 129-135, 1992.
18. Yang, J-Z., Yu, C-S. ve Liu, C-W., “A New Method For Power Signal Harmonic Analysis”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Cilt 20, No 2, 1235-1239, 2005.
19. Yang, X., Dai, H. ve Sun Y., “SIMO Fourier Neural Networks Research”, **IEEE International Conference on Intelligent Transportation**



- Systems**, Şangay, Çin, 1606-1609, 12-15 Ekim 2003.
20. Nanda, S., Biswal, M. ve Dash, P.K., “Estimation of Time Varying Signal Parameters Using an Improved Adaline Learning Algorithm”, **International Journal of Electronics and Communications (AEU)**, Cilt 68, No 2, 115-129, 2014.
21. Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, IEC Std. 61000-4-7, 2002.

