

DÖNÜŞÜM TABANLI HARMONİK KESTİRİM YÖNTEMLERİNDE GÜRÜLTÜ DUYARLILIĞI

*Fahri VATANSEVER** 
*Meltem KULU** 

Alınma: 07.04.2020 ; düzeltme: 25.05.2020 ; kabul: 01.06.2020

Öz: Harmoniklerin tespit edilmesi, ölçülmesi, kontrol edilmesi ve bastırılması son derece önemlidir. Bu amaçlarla harmonik analizi alanında birçok yöntem mevcuttur. Ancak bu yöntemler - diğer alanlara ait yöntemler gibi - örnekleme, pencereleme, gürültü gibi faktörlerden etkilenmektedirler. Gerçekleştirilen çalışmada; harmonik analizi alanındaki yaygın beş farklı dönüşüm tabanlı yöntemin (hızlı Fourier dönüşümü, chirp z-dönüşümü, Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü, dalgacık dönüşümü) gürültü duyarlılıkları incelenmiştir. Farklı gürültü seviyelerinde, ilgili yöntemlerin karşılaştırmalı analizleri yapılarak performans analizleri sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, harmonik kestirimi, gürültü duyarlılığı.

The Noise Sensitivity in Transform based Harmonic Estimation Methods

Abstract: The detecting, measuring, controlling and suppressing harmonics is extremely important. For these purposes, there are many methods in the field of harmonic analysis. However, like the methods of other fields, these methods are affected by factors such as sampling, windowing, and noise. In this study, noise sensitivities of five different transform based methods (fast Fourier transform, chirp z-transform, Hartley transform, Hilbert-Huang transform, wavelet transform) in the harmonic analysis were investigated. Performance analyzes are presented by making a comparative analysis of the related methods at different noise levels.

Keywords: Harmonic, harmonic estimation, noise sensitivity.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sistemlerdeki elemanların/bileşenlerin ve yüklerin çeşitliliği de artmaktadır. Özellikle anahtarlama elemanlarının ve doğrusal olmayan yüklerin tür ve sayılarındaki artışlar, sistemlerde istenmeyen harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Güç kalitesini belirleyen parametrelerin başında da harmonikler gelmektedir. Bu nedenle harmonik analizi, işaret ve sistemler alanında son derece önemlidir.

Güç kalitesini etkileyen başlıca parametrelerden olan harmoniklerin analiziyle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bunlar genellikle harmoniklerin ölçülmesi, modellenmesi, kestirimi konuları üzerinde yoğunlaşmakta olup çeşitli öneriler/yöntemler sunulmaktadır. Harmoniklerin ölçülmesi/kestiriminde genellikle sistemdeki akım veya gerilim işareti örneklendikten sonra içindeki bileşenlerin (harmoniklerin) genlik, frekans ve faz açılarının tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Parametrik, parametrik olmayan ve hibrit olarak sınıflandırılabilen bu yöntemler arasında Fourier, chirp z, Hilbert-Huang, dalgacık, Hartley vb. dönüşümleri, Prony

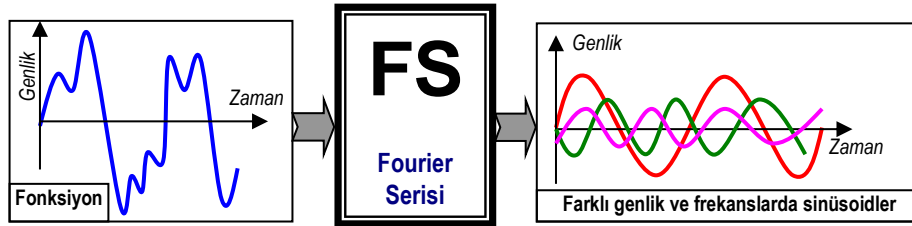
*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü, 16059 Bursa/Türkiye
İletişim yazarı: Fahri Vatansever (fahriv@uludag.edu.tr)

yöntemi, yapay sinir ağları (ANN), faz kilitlemeli döngü (PLL), genişletilmiş faz kilitlemeli döngü (EPLL), uyarlamalı doğrusal elemanlar (ADALINE), otoregresif hareketli ortalama (ARMA), en küçük kareler yaklaşımı, destek vektör makineleri (SVM), Pisarenko harmonik ayrıştırma (PHD), çoklu işaret sınıflandırma (MUSIC), işaret parametrelerinin rotasyonel değişmezlik tekniğiyle kestirimi (ESPRIT), Kalman filtreleme, adaptif filtreler, evrimsel algoritmalar, metasezgisel algoritmalar vb. yer almaktadırlar (Chen and Chen, 2014; Jain and Singh, 2011; Rodrigues et al., 2010; Singh, 2009; Vatansever ve diğ., 2009; Vatansever ve Çengelci, 2011; Vatansever ve Yalçın, 2016; Vatansever and Yalcin, 2018).

Gerçekleştirilen çalışmada; harmonik kestiriminde kullanılan yaygın beş farklı dönüşüm tabanlı yöntemin gürültü hassasiyetleri incelenmiştir. Orijinal işarete farklı seviyelerde gürültü ekleyerek hızlı Fourier, chirp z, Hartley, Hilbert-Huang ve dalgacık paket dönüşümü kullanılarak analizler yapılmış ve karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur.

2. DÖNÜŞÜM TABANLI HARMONİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Fonksiyonların (işaretlerin, sinyallerin), farklı genlik ve frekanslarda temel trigonometrik fonksiyonların toplamı (Şekil 1) şeklinde gösterilmesini ifade eden Fourier serileri, temel olarak Tablo 1'deki gibi üç şekilde yazılabilmektedir/oluşturulabilmektedir (Vatansever, 2018). Tablo 1'deki harmonik gösterimde görüldüğü gibi herhangi bir işaret (fonksiyon), farklı genlik ve frekanslardaki *Cos* veya *Sin* bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilebilmektedirler. Harmonik olarak adlandırılan bu bileşenler; işaretin hangi frekanslarında ne büyüklükte değerler içerdiğini göstermektedirler.



Şekil 1:
Fourier serileri

Harmonik analizinde (ölçülmesi, kestirimi, modellenmesi vb.) farklı yöntemler mevcuttur. Bunlar içinde matematiksel dönüşümlere dayalı yöntemler, önemli bir yere sahiptir. Tablo 2'de bu çalışmada kullanılan yöntemlerin temelini oluşturan matematiksel dönüşümler özetlenmektedir (Poularikas, 2010; Bi and Zeng, 2004; Debnath and Bhatta, 2007).

3. GÜRÜLTÜ DUYARLILIĞI

Bu çalışmada; hızlı Fourier dönüşümü, chirp z dönüşümü, Hartley dönüşümü, Hilbert-Huang dönüşümü ve dalgacık paket dönüşümü tabanlı harmonik ölçüm/kestirim yöntemlerinin işarettaki gürültüden ne ölçüde etkilendiklerini tespit etmek için farklı seviyelerde gürültüler eklenerek sonuçlar gözlemlenmiştir. MATLAB (MathWorks, 2019) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde farklı seviyelerdeki işaret-gürültü oranıyla (SNR) oluşturulan giriş işaretlerinden, bir periyot boyunca 1024 örnek alınmıştır.

Tablo 1. Fourier serisi gösterimleri

Fourier serisi	İfade	Açıklama
Trigonometrik	$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)\}$	$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt$ $a_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt$ $b_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$
Karmaşık (kompleks) üstel	$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t}$	$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$
Harmonik (kutupsal)	$x(t) = R_0 + \sum_{k=1}^{\infty} R_k \cos(k\omega_0 t \mp \theta_k)$ $x(t) = R_0 + \sum_{k=1}^{\infty} R_k \sin(k\omega_0 t \mp \theta_k)$	R_0 : Doğru (ortalama) bileşen R_k : k . harmoniğin genliği θ_k : k . harmoniğin faz açısı $R_k \cos(k\omega_0 t \mp \theta_k)$: k . harmonik bileşen $R_k \sin(k\omega_0 t \mp \theta_k)$: k . harmonik bileşen

Tablo 2. Matematiksel dönüşümler

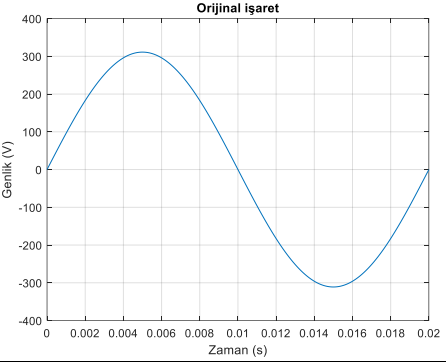
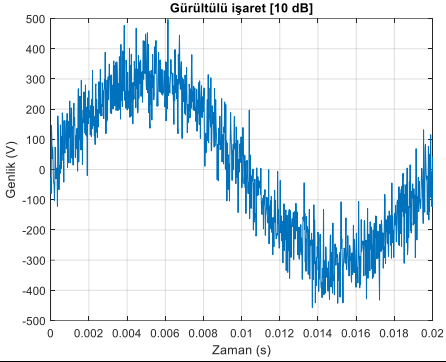
	Dönüşüm	Ters dönüşüm
Fourier	$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$	$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$
z	$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] z^{-n}$	$x[n] = \frac{1}{j2\pi} \oint_C X(z) z^{n-1} dz$
Hartley	$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \text{Cas}(2\pi ft) dt$	$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \text{Cas}(2\pi ft) df$
	$\text{Cas}(\alpha) = \text{Cos}(\alpha) + \text{Sin}(\alpha)$	
Hilbert	$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t}$	$x(t) = \frac{-1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau = -\hat{x}(t) * \frac{1}{\pi t}$
PV : İntegralin Cauchy prensip değeri		
Dalgacık	$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt$	$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W(a, b) \psi_{a,b}(t) da db$
	$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ \hat{\psi}(w) ^2}{ w } dw < \infty,$ a : Ölçekleme/yayılm parametresi , b : Dönüşüm/öteleme parametresi , C_ψ : Dalgacık sabiti	

Birinci uygulama olarak sadece temel bileşen/harmonik içeren

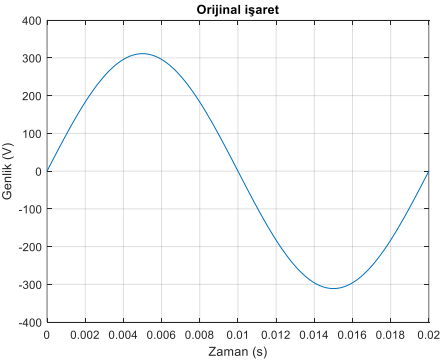
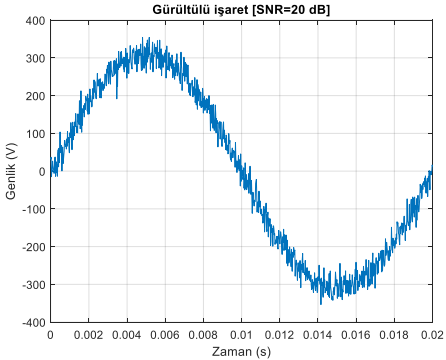
$$x(t) = 220\sqrt{2} \sin(2\pi 50t) \quad (1)$$

saf (harmoniksiz) işaretindeki farklı seviyelerdeki SNR değerleriyle elde edilmiş genlik ve bağıl hata değerleri, Tablo 3-6'da verilmektedir. Tablo 7'de gürültüsüz ve gürültülü bileşene göre bağıl hata değerlerinin değişim grafikleriyle ortalama bağıl hata değerlerinin karşılaştırması yer almaktadır. Tablo 7'den de görüldüğü gibi genel olarak gürültüsüz duruma göre bağıl hata değerlerinde Fourier dönüşümü, gürültülü duruma göre de Hilbert-Huang dönüşümü en iyi sonucu vermektedir. Buna karşın her iki durumda da Hartley dönüşümü, en yüksek ortalama bağıl hata değerine sahiptir.

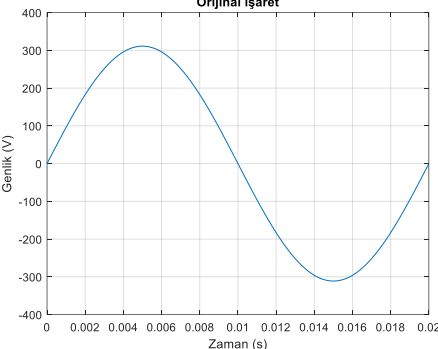
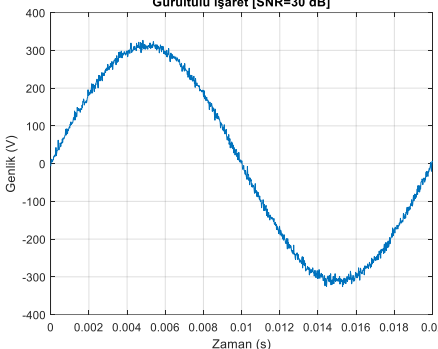
Tablo 3. SNR=10 dB için saf işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=10 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağıl hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	217.1038355429795	1.316438389554768	5.108481735423681
Chirp-z	1	217.1038355429767	1.316438389556047	5.108481735424911
Hartley	1	216.0176174802153	1.810173872629406	5.583244794695829
Hilbert-Huang	1	223.1289864040858	1.422266547311724	2.475015073936213
Dalgacık	1	217.5257366811796	1.124665144918360	4.924077625467574
RMS değeri	Gürültüsüz		220.0000000000000	
	Gürültülü		228.7916133216997	

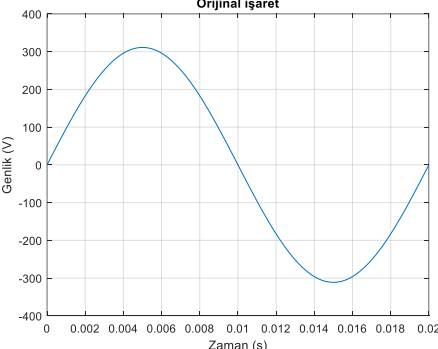
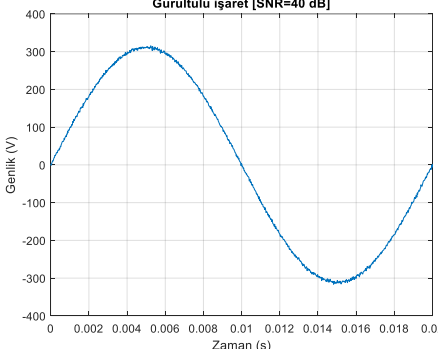
Tablo 4. SNR=20 dB için saf işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=20 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağıl hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	219.8374759215951	0.073874581093143	0.490552102641752
Chirp-z	1	219.8374759215922	0.073874581094460	0.490552102643064
Hartley	1	219.6262551440937	0.169884025411952	0.586161201433941
Hilbert-Huang	1	220.3789397753146	0.172245352415724	0.245458453735318
Dalgacık	1	219.8706075723578	0.058814739837358	0.475555058750551
RMS değeri	Gürültüsüz		220.0000000000000	
	Gürültülü		220.9212095602746	

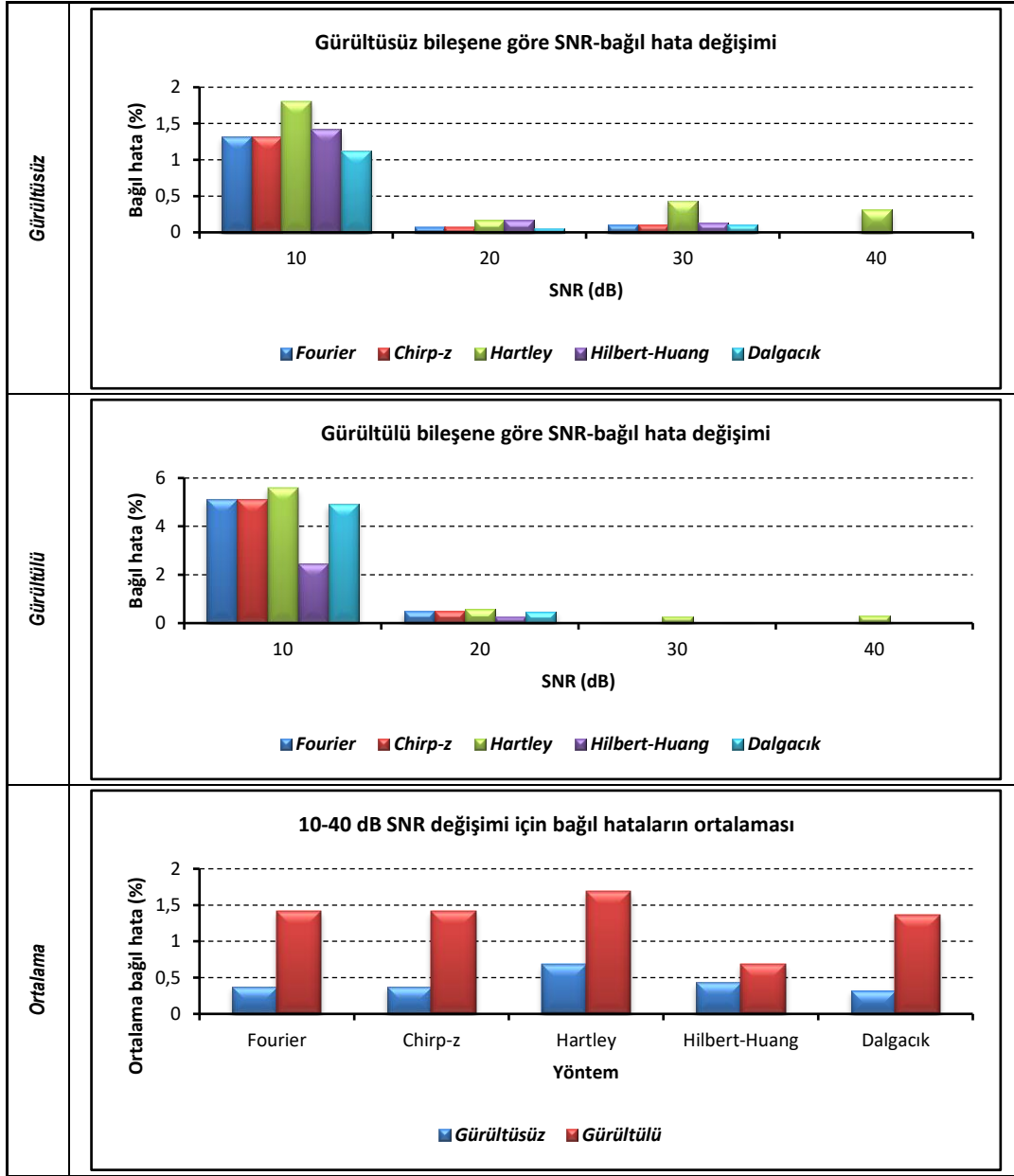
Tablo 5. SNR=30 dB için saf işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=30 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağıl hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	220.2366572119908	0.107571459995819	0.048823976244319
Chirp-z	1	220.2366572119880	0.107571459994540	0.048823976245596
Hartley	1	220.9612939266601	0.436951784845496	0.280041766353061
Hilbert-Huang	1	220.2977828204971	0.135355827498684	0.021083015530900
Dalgacık	1	220.2404471880226	0.109294176373915	0.047103951220888
RMS değeri	Gürültüsüz	220.0000000000000		
	Gürültülü	220.3442380304225		

Tablo 6. SNR=40 dB için saf işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=40 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan	Bağıl hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	219.9895727919419	0.004739640026411	0.005187761301247
Chirp-z	1	219.9895727919392	0.004739640027638	0.005187761302474
Hartley	1	220.6808465030139	0.309475683188135	0.309026153780846
Hilbert-Huang	1	219.9994217162951	0.000262856229497	0.005187761302474
Dalgacık	1	219.9902206185413	0.004445173390324	0.004893295984791
RMS değeri	Gürültüsüz	220.0000000000000		
	Gürültülü	220.0009859179517		

Tablo 7. Saf işaret için karşılaştırma sonuçları

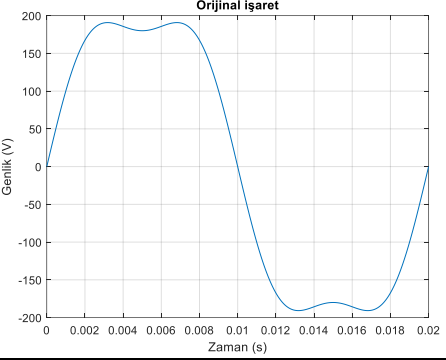
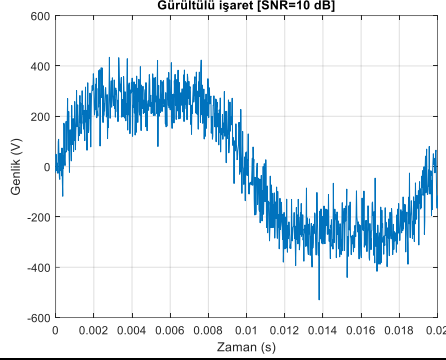


İkinci uygulama olarak birinci (temel) ve üçüncü harmonik içeren

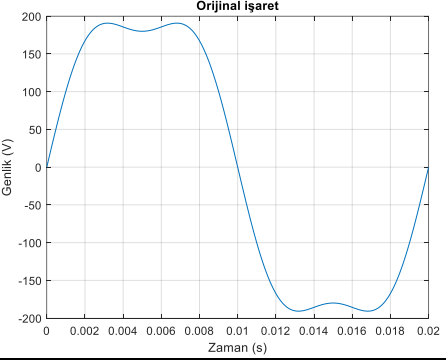
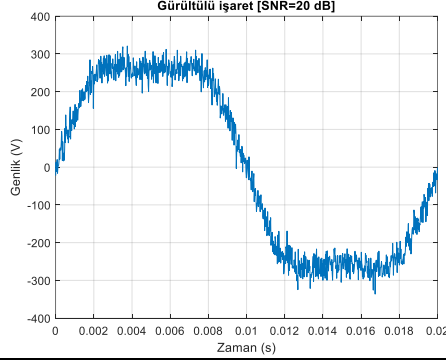
$$x(t) = \sqrt{2} \{220 \sin(2\pi 50t) + 40 \sin(2\pi 150t)\} \quad (2)$$

işareti için farklı seviyelerdeki SNR değerleriyle elde edilmiş genlik ve bağıl hata değerleri, Tablo 8-11'de verilmektedir. Tablo 12'de de gürültüsüz ve gürültülü bileşene göre bağıl hata değerlerinin değişim grafikleriyle ortalama bağıl hata değerlerinin karşılaştırması yer almaktadır. Tablo 12'den de görüldüğü gibi genel olarak temel harmonik kestiriminde her iki durumda da Hilbert-Huang dönüşümü en düşük ortalama bağıl hata değerine sahipken, Hartley dönüşümü en yüksek ortalama bağıl hata değeriyle dikkat çekmektedir. Üçüncü harmonik kestiriminde ise gürültüsüz durumda Fourier dönüşümü, gürültülü durumda ise Hilbert-Huang dönüşümü en düşük ortalama bağıl hata değerine sahiptir.

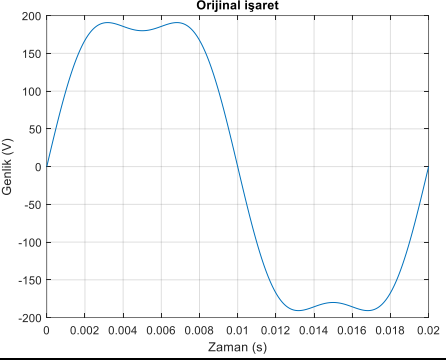
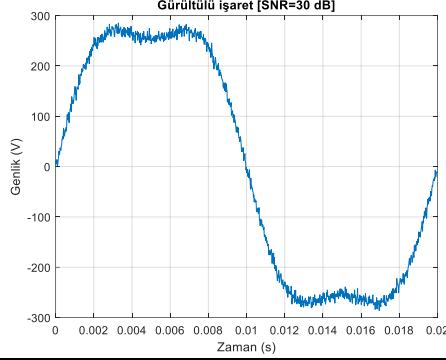
Tablo 8. SNR=10 dB için harmonikli işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=10 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağlı hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	221.7554791215339	0.797945055242686	0.787491605778401
	3	42.04124611828739	5.103115295718474	21.80526328640582
Chirp-z	1	221.7554791215311	0.797945055241407	0.787491605779660
	3	42.04124611828578	5.103115295714442	21.80526328640882
Hartley	1	221.8371016978680	0.835046226303640	0.750973993804239
	3	43.77442872030662	9.436071800766541	18.58162531763202
Hilbert-Huang	1	222.1071961810252	0.957816445920540	0.630134809655924
	3	49.01065623401681	22.52664058504202	8.842488883497094
Dalgacık	1	221.7694614667222	0.804300666691905	0.781235960845258
	3	41.96847500912376	4.921187522809394	21.94061412033202
RMS değeri	Gürültüsüz	1	220.0000000000000	
		3	40.00000000000000	
	Gürültülü	1	223.5156460719519	
		3	53.76480295889085	

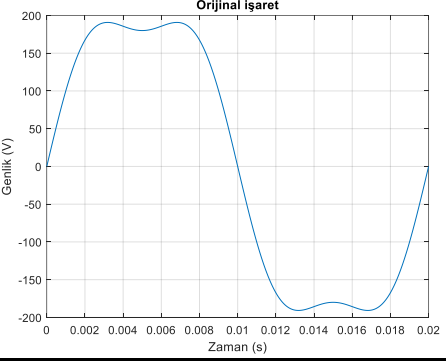
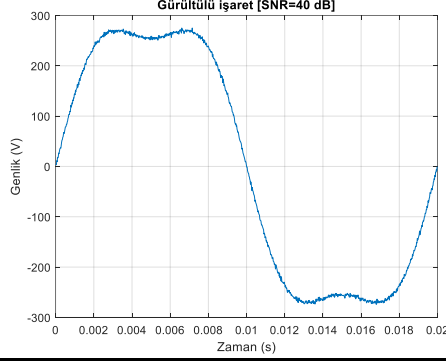
Tablo 9. SNR=20 dB için harmonikli işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=20 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağlı hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	219.3792392534403	0.282163975708959	0.241022165326835
	3	39.67421630975782	0.814459225605457	4.313098150464454
Chirp-z	1	219.3792392534375	0.282163975710225	0.241022165328102
	3	39.67421630975628	0.814459225609294	4.313098150468156
Hartley	1	220.1081621040403	0.049164592745593	0.090443103418066
	3	39.71321084750605	0.716972881234881	4.219050508110262
Hilbert-Huang	1	219.7642290036697	0.107168634695592	0.06595462339774
	3	40.71111982881032	1.777799572025796	1.812277857497202
Dalgacık	1	219.3844100513165	0.279813613037951	0.238670832937879
	3	39.55695421614760	1.107614459630994	4.595912720873298
RMS değeri	Gürültüsüz	1	220.0000000000000	
		3	40.00000000000000	
	Gürültülü	1	219.9092693361487	
		3	41.46253619136316	

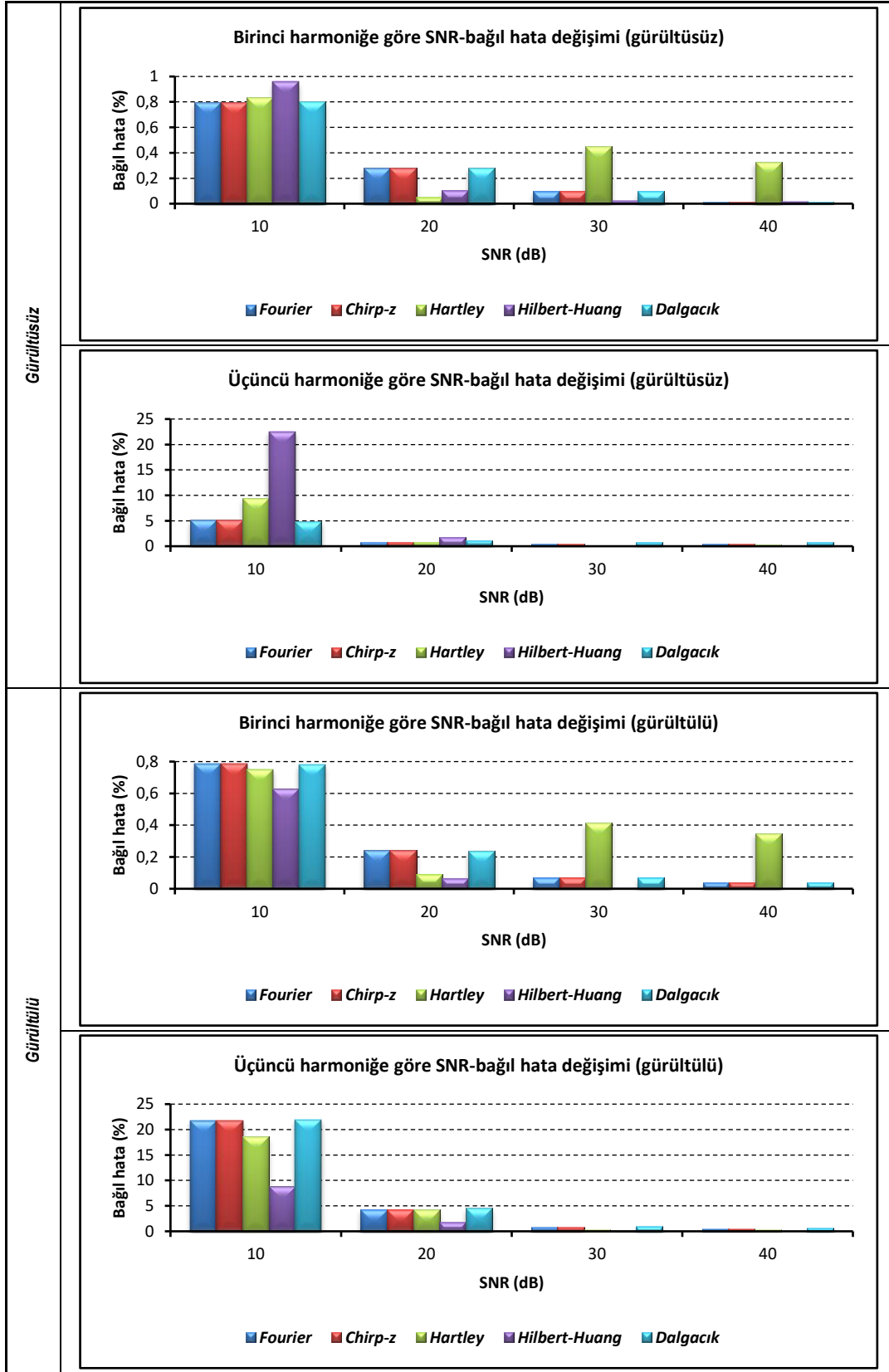
Tablo 10. SNR=30 dB için harmonikli işaret analiz sonuçları

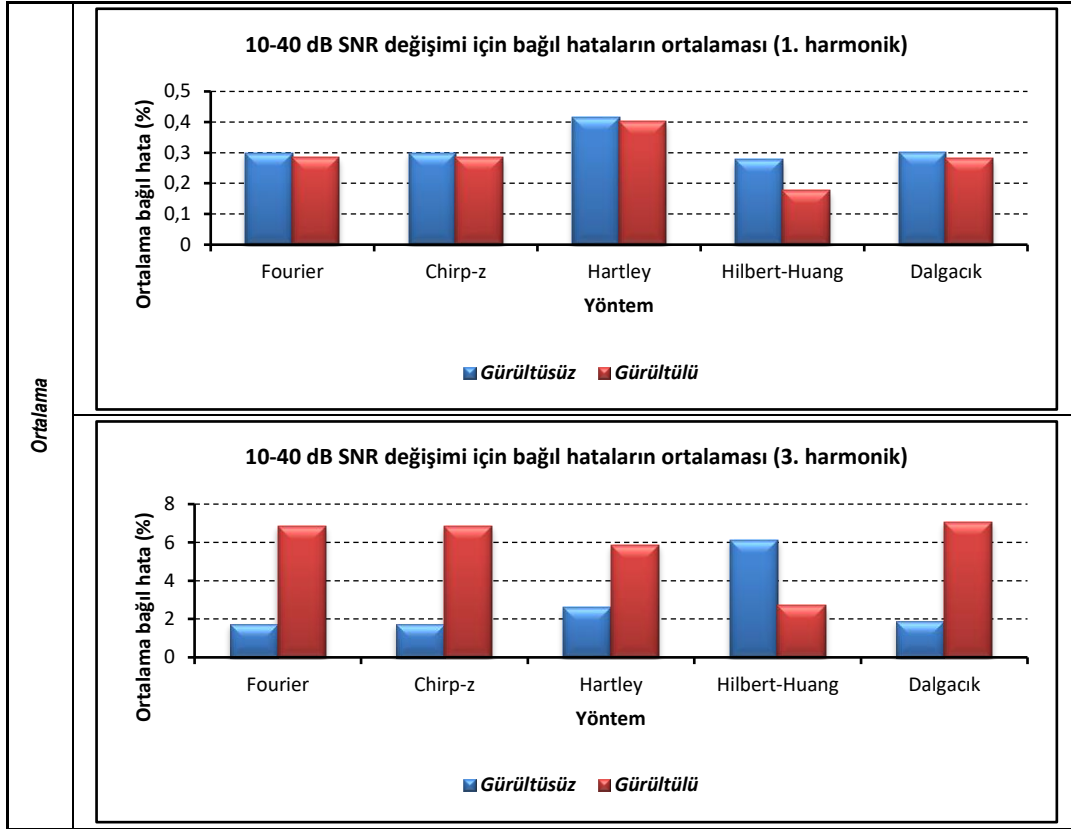
Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=30 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağlı hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	220.2206248776176	0.100284035280732	0.068897350579239
	3	39.79658360411132	0.508540989721702	0.803212444974460
Chirp-z	1	220.2206248776148	0.100284035279453	0.068897350577960
	3	39.79658360410981	0.508540989725468	0.803212444978215
Hartley	1	220.9858002998402	0.448091045381912	0.416595304956270
	3	40.00171959165125	0.004298979128130	0.291891393441110
Hilbert-Huang	1	220.0540484086636	0.024567458483450	0.006795485103364
	3	40.04092753701668	0.102318842541695	0.194161842945690
Dalgacık	1	220.2197990242447	0.099908647383958	0.068522080386243
	3	39.70318951788733	0.742026205281672	1.036006129533342
RMS değeri	Gürültüsüz	1	220.0000000000000	
		3	40.00000000000000	
	Gürültülü	1	220.0690031649908	
		3	40.11882298308876	

Tablo 11. SNR=40 dB için harmonikli işaret analiz sonuçları

Orijinal işaret			Gürültülü işaret (SNR=40 dB)	
				
Dönüşüm	Harmonik	Hesaplanan / kestirilen	Bağlı hata (%)	
			Gürültüsüz	Gürültülü
Fourier	1	220.0384205710936	0.017463895951641	0.038452750803178
	3	39.78089966864648	0.547750828383808	0.491468448624472
Chirp-z	1	220.0384205710909	0.017463895950414	0.038452750801950
	3	39.78089966864497	0.547750828387574	0.491468448628240
Hartley	1	220.7246649627627	0.329393164892131	0.350447478693482
	3	40.12370576781574	0.309264419539357	0.366031804495106
Hilbert-Huang	1	219.9561872134224	0.019914902989820	0.001066107849732
	3	39.97065903197999	0.073352420050021	0.016801567012328
Dalgacık	1	220.0376009642269	0.017091347375862	0.038080124047372
	3	39.69329446557310	0.766763836067241	0.710605400948407
RMS değeri	Gürültüsüz	1	220.0000000000000	
		3	40.00000000000000	
	Gürültülü	1	219.9538422682442	
		3	39.97737585757447	

Tablo 12. Harmonikli işaret için karşılaştırma sonuçları





4. SONUÇLAR

Harmonik kestirimi, güç sistemleri ve işaret işleme alanındaki temel işlemlerdendir. Bu amaçla birçok yöntem ve teknik geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada; harmonik kestiriminde kullanılan yaygın beş farklı dönüşüm tabanlı yöntemin (Fourier dönüşümü hesaplamak için hızlı Fourier dönüşümü algoritması, z dönüşümünün genelleştirilmiş yaklaşımı olan chirp z-dönüşümü, Hartley dönüşümü hesaplamak için ayrık Hartley dönüşümü algoritması, görgül kip ayrışımı ve Hilbert dönüşümüne dayanan Hilbert-Huang dönüşümü, dalgacık paket dönüşümü) gürültü hassasiyetleri incelenmiştir. Saf ve harmonikli işaretlere, belirli oranlarda gürültüler eklenerek yöntemlerin etkilenme durumları ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Bi, G., Zeng, Y. (2004) *Transforms and Fast Algorithms for Signal Analysis and Representations*, Birkhäuser, USA.
2. Chen, C., Chen, Y. (2014) Comparative study of harmonic and interharmonic estimation methods for stationary and time-varying signals, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (1), 397-404. doi: 10.1109/TIE.2013.2242419
3. Debnath, L., Bhatta, D. (2007) *Integral Transforms and Their Applications*, 2nd ed., Chapman & Hall/CRC, USA.
4. Jain, S.K., Singh, S.N. (2011) Harmonics estimation in emerging power system: Key issues and challenges, *Electric Power Systems Research*, 81, 1754-1766. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.05.004>
5. MathWorks (2019). MATLAB. <https://www.mathworks.com/>.

6. Poularikas, A.D. (Ed.) (2010) *Transforms and Applications Handbook*, 3rd ed., CRC Press, USA.
7. Rodrigues, R.P., Silveira, P.M., Ribeiro, P.F. (2010) A survey of techniques applied to non-stationary waveforms in electrical power systems, *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010)*, Bergamo, 1-8. doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625503
8. Singh, G.K. (2009) Power system harmonics research: a survey, *European Transactions on Electrical Power*, 19, 151-172. doi: <https://doi.org/10.1002/etep.201>
9. Vatansever, F. (2018) *Sayısal Hesaplama ve Programlama*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
10. Vatansever, F., Çengelci, B. (2011) Prony yöntemiyle harmonik analizi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ/Turkey, 16-18 May. 134-137.
11. Vatansever, F., Uyaroğlu, Y., Özdemir, A. (2009) Dalgacık paket tabanlı harmonik analizi, *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, Karabük/Turkey, 13-15 May. 432-437.
12. Vatansever, F., Yalçın, N.A. (2016) Çevrimiçi harmonik simülatörü tasarımı, *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016)*, Alanya/Antalya/Turkey, 3-5 November, 618-624.
13. Vatansever, F., Yalçın, 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

