

# ÇEŞİTLİ YÜK TİPLERİ İÇİN HARMONİK ÜRETEK YÜK MODELLERİNİN HASSASİYET ANALİZİ. KISIM II: FARKLI GERİLİM DALGA ŞEKİLLERİNDE ANALİZ

<sup>1</sup>M. Erhan BALCI

<sup>1</sup>mbalci@balikesir.edu.tr

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Balıkesir Üniversitesi

<sup>2</sup>Özgür KARACASU

<sup>2</sup>karacasu@gyte.edu.tr

<sup>3</sup>M. Hakan HOCAOĞLU

<sup>3</sup>hocaoglu@gyte.edu.tr

<sup>2,3</sup>Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

## ÖZET

Bu çalışma [1]'deki çalışmanın devamı olup çeşitli yük tipleri için yaygın olarak bilinen harmonik üreten yüklerle ait modellerin; oluşturuldukları gerilim dalga şekillerinden farklı dalga şekillerine sahip besleme gerilimindeki hassasiyetlerini ve dolayısıyla performanslarını istatistiksel biçimde analiz etmeyi amaçlamıştır. Analizlerde gerçek testlerden elde edilen ölçümsel veriler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar harmonik analizi çalışmalarında test edilen yükler için model seçiminde bir yol gösterici olacak biçimde yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Harmonik üreten yük modelleri, harmonik analizleri, hassasiyet.

## 1. Giriş

[1]'de sunulan çalışmada; Sabit Akım Kaynağı (SAK) [2], Norton (N) [3], Çapraz Frekans Admittans Matris (ÇFAM) [4, 5] ve Güç Bileşenleri Temelli (GBT) [6] modellerinin,

- Pasif empedans (R-L), monitör, dimmer kontrollü resistans (R) ve kompakt floresan lambadan oluşan karma yük grubu (Grup 1),
- Sabit aktif güç besleyen aa/da/aa dönüştürücü yükü (Grup 2),
- Asenkron motorun tam yükte sabit devirle ve sabit torkta çalışma durumları (sırasıyla Grup 3 ve 4),

olmak üzere dört tip yük için; oluşturuldukları gerilimden farklı seviyedeki besleme gerilimleri altındaki hassasiyetleri ölçümsel veriler yardımıyla analiz edilmiştir.

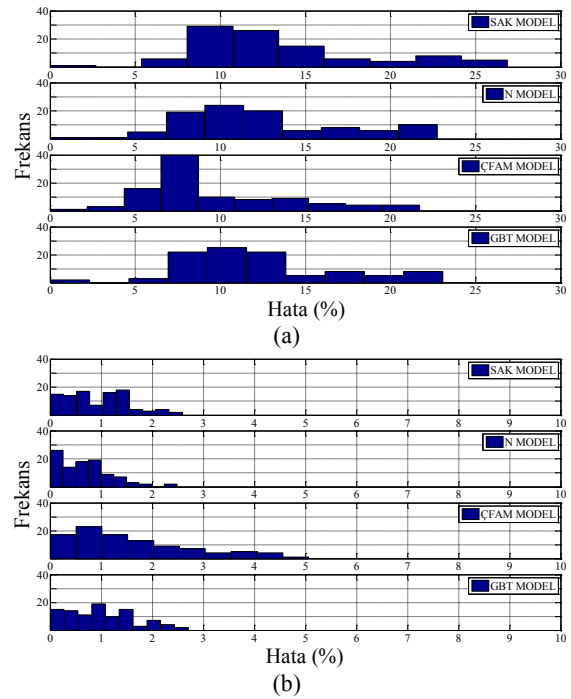
Bu çalışmada yukarıda sıralanan yük tipleri için SAK, N, ÇFAM ve GBT modellerinin; oluşturuldukları gerilim dalga şekillerinden farklı dalga şekillerine sahip besleme gerilimindeki hassasiyetleri ölçümsel veriler kullanılarak istatistiksel biçimde analiz edilmiştir. Analiz sonuçları harmonik analizi çalışmalarında test edilen yükler için model seçiminde bir yol gösterici olacak biçimde yorumlanmıştır.

## 2. Analiz

Bu kısımda yukarıda belirtilen ve akım dalga şekilleri [1]'de sunulan yük grupları için SAK, N, ÇFAM ve GBT modellerinin hassasiyeti; 220V etkin değerde rastgele harmonik içeriğe sahip ve THD'si % 5 olan 100 adet gerilim dalga şekli altında test edilmiştir. Modeller kullanılarak test gerilimleri için hesaplanan akımlar ile bu test gerilimlerinde sistemde ölçülen

akımların; rms değer ve dalga şekli karşılaştırılması [1]'de verilmiş olan etkin değer hata (EDH) ve şekil faktörü hata (ŞFH) ifadeleri ile yapılmıştır. Hesap edilen EDH ve ŞFH değerleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Aşağıda grup 1, 2, 3 ve 4 için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Grup 1 için modellerin ŞFH ve EDH'larına ait histogramlar Şekil 1'de verilmiştir.



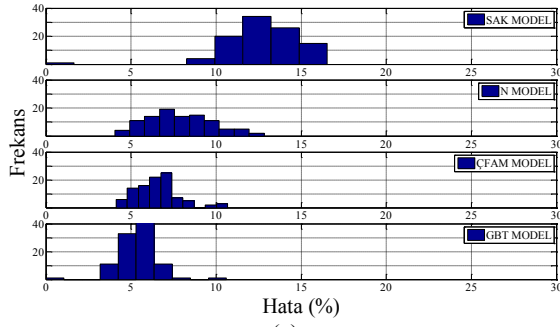
Şekil 1: Grup 1 için modellerin (a) ŞFH ve (b) EDH histogramları.

Şekil 1 (a)'dan modellerin ŞFH'larına ait azami değerlerin yaklaşık olarak; ÇFAM, N ve GBT için %22, ve SAK için %26 olduğu görülmektedir. Şekil 1 (b)'den ise modellerin EDH'larının azami değerlerin yaklaşık olarak; SAK, N ve GBT için %2.5, ve ÇFAM için %5 olduğu görülmektedir. Şekil 1'de verilen ŞFH ve EDH histogramlarına ait ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'den ŞFH'ların ortalamalarının küçükten büyüğe sırasıyla ÇFAM için 9.58, GBT için 12.32, N için 12.35 ve SAK için 13.40 olduğu görülmektedir. ŞFH'ların standart sapma değerleri ÇFAM için 4.36, GBT için 4.52, N için 4.83 ve SAK için 5.11'dir. EDH'ların ortalamaları ise N için 0.68, SAK için 0.96, GBT için 1.02 ve ÇFAM için 1.59 olduğu görülmektedir. EDH'ların standart sapma değerleri N için 0.52, SAK için 0.61, GBT için 0.66 ve ÇFAM için 1.20'dir.

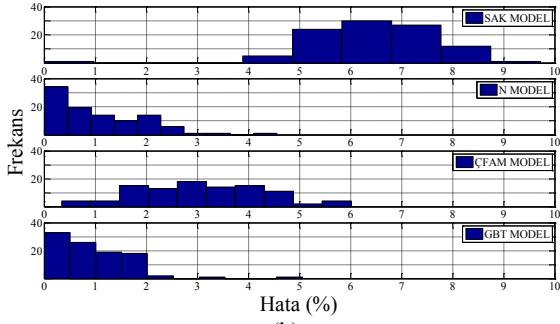
Tablo 1: Grup 1 için modellerin ŞFH ve EDH histogramlarına ait istatistiksel değerler.

	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH
	Ortalama		Ortanca		Standart Sapma	
SAK	13.40	0.96	11.55	0.93	5.11	0.61
N	12.35	0.68	11.41	0.65	4.83	0.52
ÇFAM	9.58	1.59	7.99	1.30	4.36	1.20
GBT	12.32	1.02	11.26	0.96	4.52	0.66

Grup 2 için oluşturulan modellerin ŞFH ve EDH'larına ait histogramlar Şekil 2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2: Grup 2 için modellerin (a) ŞFH ve (b) EDH histogramları.

Şekil 2 (a)'dan modellerin ŞFH'larına ait azami değerlerin yaklaşık olarak; N için %5, SAK için %9, ÇFAM ve GBT için %11, N için %13 ve SAK için %16 olduğu görülmektedir. Şekil 2 (b)'den ise modellerin EDH'larına ait azami değerlerin yaklaşık olarak; GBT ve N için %5, ÇFAM için %6 ve SAK için %10 olduğu görülmektedir.

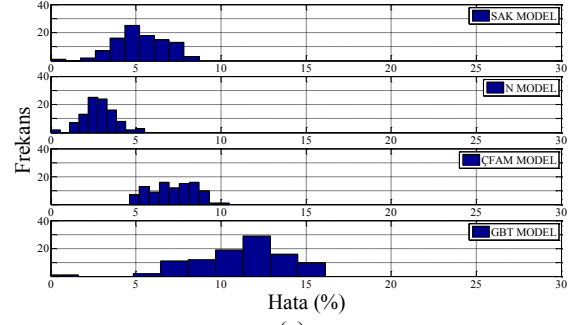
Şekil 2'de verilen ŞFH ve EDH histogramlarına ait ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Grup 2 için modellerin ŞFH ve EDH histogramlarına ait istatistiksel değerler.

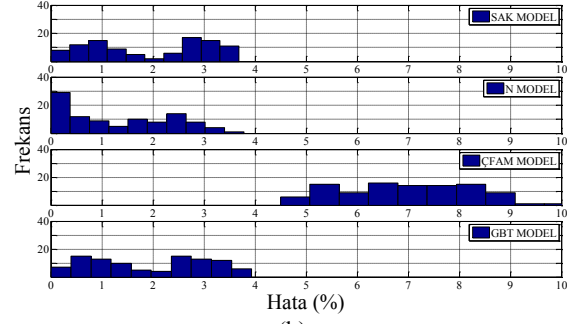
	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH
	Ortalama		Ortanca		Standart Sapma	
SAK	12.75	6.45	12.87	6.43	2.13	1.26
N	7.82	1.06	7.65	0.82	1.92	0.88
ÇFAM	6.55	3.08	6.58	2.95	1.31	1.22
GBT	5.36	0.94	5.34	0.82	1.12	0.79

Tablo 2'den ŞFH'ların ortalamalarının küçükten büyüğe sırasıyla GBT için 5.36, ÇFAM için 6.55, N için 7.82 ve SAK için 12.75 olduğu görülmektedir. ŞFH'ların standart sapma değerleri GBT için 1.12, ÇFAM için 1.31, N için 1.92 ve SAK için 2.13'dür. EDH'ların ortalamaları ise GBT için 0.94, N için 1.06, ÇFAM için 3.08 ve SAK için 6.45 olduğu görülmektedir. EDH'ların standart sapma değerleri GBT için 0.79, N için 0.88, ÇFAM için 1.22 ve SAK için 1.26'dır.

Grup 3 için oluşturulan modellerin ŞFH ve EDH'larına ait histogramlar Şekil 3'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3: Grup 3 için modellerin (a) ŞFH ve (b) EDH histogramları.

Şekil 3 (a)'dan modellerin ŞFH'larının azami değerlerinin yaklaşık olarak; N için %5, SAK için %9, ÇFAM için %10 ve GBT için %16 olduğu görülmektedir. Şekil 3 (b)'den ise modellerin EDH'larına ait azami değerlerinin yaklaşık olarak; N, SAK ve GBT için %4, ve ÇFAM için %10 olduğu görülmektedir.

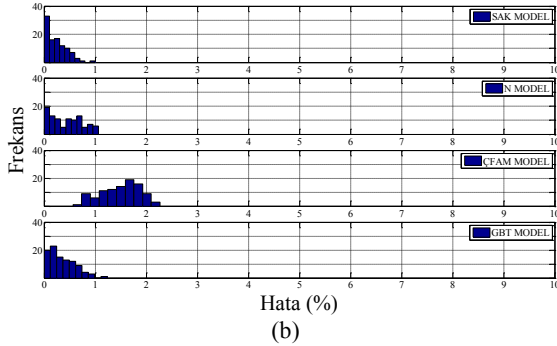
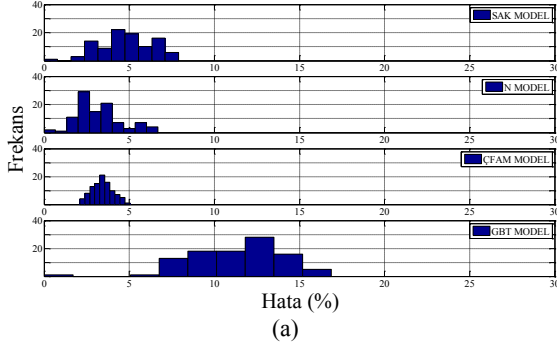
Şekil 3'de verilen ŞFH ve EDH histogramlarına ait ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3: Grup 3 için modellerin ŞFH ve EDH histogramlarına ait istatistiksel değerler.

	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH
	Ortalama		Ortanca		Standart Sapma	
SAK	5.29	1.91	5.17	1.93	1.54	1.12
N	2.86	1.35	2.83	1.18	0.98	1.07
ÇFAM	7.18	6.96	7.22	6.98	1.30	1.28
GBT	11.24	1.95	11.52	1.98	2.75	1.14

Tablo 3’den ŞFH’ların ortalamalarının küçükten büyüğe sırasıyla N için 2.86, SAK için 5.29, ÇFAM için 7.18 ve GBT için 11.24 olduğu görülmektedir. ŞFH’ların standart sapma değerleri N için 0.98, ÇFAM için 1.30, SAK için 1.54 ve GBT için 2.75’dir. EDH’ların ortalamaları ise N için 1.35, SAK için 1.91, GBT için 1.95 ve ÇFAM için 6.96 olduğu görülmektedir. EDH’ların standart sapma değerleri N için 1.07, SAK için 1.12, GBT için 1.14 ve ÇFAM için 1.28’dir.

Grup 4 için oluşturulan modellerin ŞFH ve EDH’larına ait histogramlar Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4: Grup 4 için modellerin (a) ŞFH ve (b) EDH histogramları.

Şekil 4 (a)’dan modellerin ŞFH’larına ait azami değerlerin yaklaşık olarak; ÇFAM için %5, N için %7, SAK için %8 ve GBT için %16 olduğu görülmektedir. Şekil 4 (b)’den ise modellerin EDH’larına ait azami değerlerin yaklaşık olarak; N, SAK ve GBT için %1, ve ÇFAM için %2 olduğu görülmektedir.

Şekil 4’de verilen ŞFH ve EDH histogramlarına ait ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4: Grup 4 için modellerin ŞFH ve EDH histogramlarına ait istatistiksel değerler.

	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH	ŞFH	EDH
	Ortalama		Ortanca		Standart Sapma	
SAK	4.81	0.23	4.78	0.20	1.53	0.19
N	3.21	0.44	2.94	0.44	1.34	0.30
ÇFAM	3.41	1.49	3.33	1.52	0.60	0.37
GBT	11.23	0.35	11.56	0.29	2.69	0.26

ŞFH’ların ortalamalarının küçükten büyüğe sırasıyla N için 3.21, ÇFAM için 3.41, SAK için 4.81 ve GBT için 11.23 olduğu Tablo 4’den görülmektedir. ŞFH’ların standart sapma değerleri ÇFAM için 0.60, N için 1.34, SAK için 1.53 ve GBT için 2.69’dur. EDH’ların ortalamalarının ise SAK için 0.23, GBT için 0.35, N için 0.44 ve ÇFAM için 1.49 olduğu görülmektedir. EDH’ların standart sapma değerleri SAK için 0.19, GBT için 0.26, N için 0.30 ve ÇFAM için 0.37’dir.

SAK, N, ÇFAM ve GBT modellerinin analizlere dâhil edilen yük tipleri için akım dalga şekli ve etkin değerinin belirlenmesindeki performansları; ŞFH ve EDH’larının ortalamaları (ŞFOH ve EDOH) göz önünde bulundurularak hazırlanan Tablo 5 yardımıyla kısaca özetlenebilir. Bu tabloda, ortalama hatalara göre model hassasiyetleri I ile IV arası sayılarıyla en iyiden en kötüye doğru sıralanmıştır. Bu sıralama yapılırken birbirine çok yakın ortalama değerlere sahip modeller arasında standart sapması küçük olan bir başka ifadeyle daha tutarlı olana öncelik verilmiştir. Bununla birlikte [1]’deki biçimde hata miktarları tabloda beyaz, açık gri ve koyu gri renklerle derecelendirilmiştir.

Tablo 5’den aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Modeller akım dalga şeklinin belirlenmesinde etkin değer hesabına göre daha kötü performansa sahiptir. Bu sonuç akım harmoniklerinin faz açısı hesabında modellerin yetersizliğini göstermektedir.
- Grup 1 için şekil bilgisinin önemli olduğu analizlerde ÇFAM model, etkin değer hesabının önemli olduğu analizlerde ise N model en iyi performansa sahiptir,
- Grup 2 için şekil bilgisinin ve etkin değer hesabının önemli olduğu analizlerde GBT model en iyi performansa sahiptir,
- Grup 3 için şekil bilgisinin ve etkin değer hesabının önemli olduğu analizlerde N model en iyi performansa sahiptir,
- Grup 4 için şekil bilgisinin önemli olduğu analizlerde ÇFAM model, etkin değer hesabının önemli olduğu analizlerde ise SAK model en iyi performansa sahiptir,
- Ayrıca test edilen yüklerin hiçbiri için modeller hassas olmayan sonuç vermemiştir.

### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada çeşitli yük tipleri için; harmonik üreten yüklere ait modellerin oluşturuldukları gerilim dalga şeklinin farklı dalga şekillerine sahip besleme gerilimlerindeki dalga şekillerine sahip besleme gerilimlerindeki hassasiyeti ölçümsel veriler yardımıyla istatistiksel biçimde analiz edilmiştir. Model hassasiyetleri harmonik analizi çalışmalarında test edilen yükler için uygun modelin seçiminde bir yol gösterici olması amacıyla sınıflandırılmıştır. Ayrıca analiz sonuçlarından; GBT modelin harmonik analizlerinde kullanılmak için hassasiyet bakımından bir engel taşımadığı görülmüştür.

Tablo 5: Ortalama hatalar ve standart sapmalar dikkate alınarak hazırlanmış olan modellere ait performans tablosu.

	Grup 1 Yüğü		Grup 2 Yüğü		Grup 3 Yüğü		Grup 4 Yüğü	
	ŞFOH	EDOH	ŞFOH	EDOH	ŞFOH	EDOH	ŞFOH	EDOH
SAK	IV	II	IV	IV	II	II	III	I
N	III	I	III	II	I	I	II	III
ÇFAM	I	IV	II	III	III	IV	I	IV
GBT	II	III	I	I	IV	III	IV	II

#### 4. Kaynakça

- [1] M. E. Balcı, O. Karacasu, M. H. Hocaoğlu, “Çeşitli Yüğü Tipleri için Harmonik Üreten Yüğü Modellerinin Hassasiyet Analizi. Kısım I: Farklı Gerilim Seviyelerinde Analizi”, EVK 2011, Kocaeli, Mayıs 2011.
- [2] IEEE Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks- Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques”, *IEEE Trans. on Power Del.*, Vol.11, No.1, pp. 452-465, Jan. 1996.
- [3] E. Thunberg, L. Söder, “A Norton Approach to Distribution Network Modelling”, *IEEE Trans. on Power Deliv.* Vol. 14, No. 1, pp. 272-277, Jan., 1999.
- [4] M. Fauri, “Harmonic Modeling of Non-Linear Load by Means of Crossed Frequency Admittance Matrix”,

*IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 12, No. 4, pp.1632-1638, Nov. 1997.

- [5] J. A. Fuentes, A. Gabaldon, F. J. Canovas, A. Molina, “Harmonic Model of Electronically Controlled Loads”, *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. 2000*, Vol.3, pp.1805-1810, July 2000.
- [6] M. E. Balcı, Ö. Karacasu, S. D. Öztürk, M. H. Hocaoğlu, “Harmonik Üreten Yüğüler için Yeni Bir Model”, 3e Electrotech, Baskı:177, sayfa: 194-202, 2009.

#### 5. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 110E113 numaralı araştırma projesi çerçevesinde yapılan çalışmaların bir ürünüdür.