

## DOĞRUSAL OLMAYAN YÜK BULUNAN TESİSLERDE GÜÇ FAKTÖRÜNE TOPLAM HARMONİK BOZULMANIN ETKİSİ

**Faruk KÜRKER<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, 02040, Türkiye  
Geliş Tarihi/Received Date: 24.02.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 17.03.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1078595

### ÖZET

Bu çalışmada, cam sanayi tesisinde ve modern bir un üretim tesisindeki değirmenlerde güç analizörü ile ölçüm yapılarak harmonik bozulmanın tanımlanması ve bu harmonik bozulmanın güç faktörüne etkisinin tespiti yapılmıştır. Başka bir ifade ile çalışma doğrusal olmayan yüklerde toplam harmonik bozulmanın güç faktörü üzerindeki etkisini sunmaktadır. Dolayısıyla toplam harmonik bozulmanın güç faktörünü etkilemesi nedeniyle güç faktörü ve toplam harmonik bozulma arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Akımın toplam harmonik bozulma değerine bağlı olarak yer değiştirme güç faktörü ile temel güç faktörü arasındaki fark grafiksel olarak incelenmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde toplam harmonik bozulma değerinin artmasına bağlı olarak temel güç faktörü değerinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca güç analizörü ile yapılan ölçüm sonuçları IEEE 519-2014 harmonik standartları ile değerlendirilmiş ve akımın toplam harmonik bozulma değerlerinin belirtilen standartın üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Harmonik, Bozulma Güç Faktörü (*distortion PF*), Güç Faktörü (*PF*), Toplam Harmonik Bozulma (*THD*), Yer Değiştirme Güç Faktörü (*dPF*).

## EFFECT OF TOTAL HARMONIC DISTORTION ON POWER FACTOR IN FACILITIES WITH NON-LINEAR LOADS

### ABSTRACT

In this study, the definition of harmonic distortion and the determination of the effect of this harmonic distortion on the power factor were made by measuring with a power analyzer in a glass industry facility and a modern flour production facility. In other words, the study presents the effect of total harmonic distortion on the power factor at non-linear loads. Therefore, since the total harmonic distortion affects the power factor, the relationship between the power factor and the total harmonic distortion is focused. Depending on the total harmonic distortion value of the current, the difference between the displacement power factor and the fundamental power factor is examined graphically. As a result of the measurements, it was observed that the fundamental power factor value decreased due to the increase in the total harmonic distortion value. In the study, the measurement results made with the power analyzer were evaluated with IEEE 519-2014 harmonic standards and it was determined that the total harmonic distortion values of the current were above the specified standard.

**Keywords:** Harmonic, Displacement Power Factor (*dPF*), Distortion Power Factor (*Distortion PF*), Total Harmonic Distortion (*THD*), Power Factor (*PF*).

### 1. Giriş

Elektrik sistemlerindeki harmonikler doğrusal olmayan yükler tarafından üretilir ve istenmeyen yan etkiler üretir. Harmonikler, elektrik mühendislerinin karşılaştığı en önemli sorunlardan biridir.

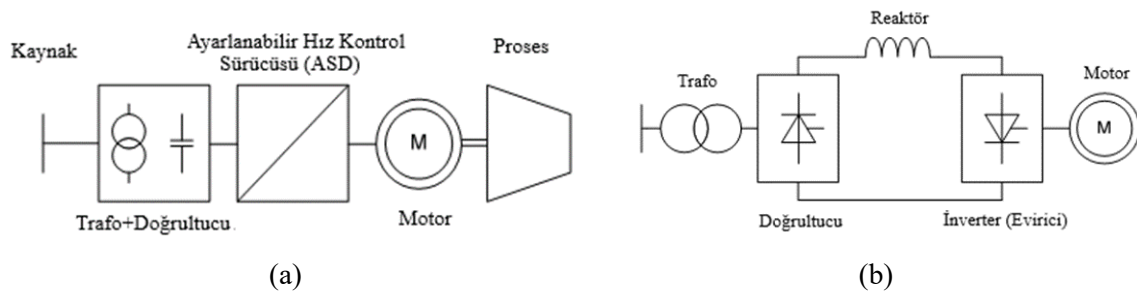
\* e-posta<sup>1</sup> : [fkurker@adiyaman.edu.tr](mailto:fkurker@adiyaman.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1544-9743> (Sorumlu Yazar)

Doğrusal olmayan yükler genellikle harmoniklerin kaynağıdır. Harmonikler, motor arızalarından aşırı yüklenmiş transformatörlere ve iletkenlere kadar çeşitli sorunlara neden olabilir. Harmoniklerin neden olduğu sorunların başlıcalarından biri güç faktörü (PF) üzerindeki etkisidir. Bu nedenle, gerçek güç faktörü hesabı yapılırken toplam harmonik bozulma (THD) da göz önünde bulundurulmalıdır. Düşük PF'de düzeltilmesi gereken en hayati rahatsızlıklardan biridir. Gerilim ( $THD_V$ ) ve akımın toplam harmonik bozulma ( $THD_I$ ) değeri arttıkça PF değeri olması gereken değerden daha aşağı düşmektedir.

PF, akım dalga biçiminin gerilim dalga biçimiyle aynı fazda olan ideal bir sinüs dalgasından sapmasını ölçmek için kullanılan bir parametredir [1]. PF, aktif güç ile görünen güç arasındaki orandır. Bazı ülkelerde sağlanan elektriğin sinüsoidal voltajı 50 Hz ve bazılarında ise 60 Hz'dir. Akım ve gerilim faz açıları aynı fazda değilse, elektrik sisteminin verimi düşer ve görünen güç (S), aktif (P) veya gerçek gücü aşar. Endüktif sistemde voltaj akımı, kapasitif sistemde ise akım voltajı yönlendirir [2]. PF, elektrik enerjisinin kullanımı için verimliliğin bir göstergesidir. Düşük PF, daha fazla enerji tüketimine, daha fazla maliyete ve cezaya, ayrıca transformatörlerde ve şebeke üzerinden güç kayıplarına karşılık gelir [3-5].

Günümüzde, güç şebekesine bağlı çoğu elektrik yükü doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yükler güç sistemine, güç kalitesini düşüren ve dolayısıyla güç kayıplarını artıran akım harmonikleri enjekte eder. Harmoniklerdeki artış, ek kayıplar, hassas ekipman ve koruma cihazlarının arızalanması, güç faktöründe azalma, seri ve paralel rezonans gibi çeşitli bozulmalara neden olabilir. Harmonikler ayrıca, üç fazlı motorlarda ek kayıplara, düşük güç faktörüne, verim ve çıkış torkunun azalmasına neden olur [6-10]. Harmonikler ve kayıplar arasındaki durum çok kompleks olsada, harmoniklerin güç faktörüne dahil edilmesiyle, doğrusal olmayan yüklerin etkilerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar [11].

Güç sistemlerinde lineer olmayan yüklerin artması ile gerilim ve akım dalga biçimleri daha da bozulmakta ve güç kalitesi bozulmaktadır. Bu gelişme nedeniyle, harmoniklerin bir sistemde üretebileceği olumsuz etkilerin değerlendirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Bu etkiler en iyi saha ölçümleri yapılarak belirlenir. Zararlı olup olmadıklarını değerlendirmek için bu ölçümlerin bir standartla değerlendirilmesi gerekir [12]. Sistemdeki gerilim ve akım için THD değeri, harmoniklerin neden olduğu bozulma miktarının bir göstergesidir. Ayarlanabilir hız sürücü (ASD) teknolojisi, sistem tasarımını büyük ölçüde etkilemektedir. Şekil 1'de ayarlanabilir hız sürücü sisteminin genel ve detaylı gösterimi verilmiştir Şebekeden alınan AC gerilim doğrultulduktan sonra motora bağlanan inverter ile motorun hız ve gücü kontrol edilir. Bu durumda şebekeden çekilen akım lineer olmayan dalga formuna sahip olur.



Şekil 1. Ayarlanabilir hız sürücü sistemi a) genel b) detaylı gösterimi [13]

Güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin PF üzerine etkileriyle ilgili literatürde bir kısım çalışmalar bulunmaktadır. [14] nolu çalışmada iki elektronik cihaz arasındaki harmonik etkileşimin analizini ve güç kalitesi ile elektrik enerjisi ölçüm sistemi üzerindeki etkisini incelemişler ve % $THD_I$  değerinin PF ve yer değiştirme güç faktörü (dPF-displacement power factor) değerlerini etkilediği tespit edilmiştir. [15] nolu çalışmada ise doğrusal olmayan yüklerde güç faktörünün düzeltilmesi ve harmonik

bileşenlerin süzülmesi ile ilgili olarak %THD<sub>1</sub> değerini azaltmak için pasif filtre kullanılmış ve %THD<sub>1</sub>'nin azalmasıyla PF değerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, modern bir un üretim tesisinde bulunan 5 adet değirmende ve cam sanayisinde 3 adet noktada güç analizörü ile ölçüm yapılarak harmonik bozulmanın güç faktörü üzerine olan etkisine bakılmıştır. Daha önce yapılmış çalışmalardan farkı; %THD<sub>1</sub> değerine bağlı olarak dPF ve gerçek PF değerleri ile bu değerler arasındaki fark grafiksel olarak incelenmiş ve %THD<sub>1</sub>'nin etkisi ölçüm sonuçları ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuca göre THD<sub>1</sub> değeri arttıkça gerçek PF değerinin de o derece azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca güç analizörü ile yapılan ölçümler IEEE 519-2014 harmonik standartları ile değerlendirilmiş ve tüm ölçümlerde THD<sub>1</sub> değerinin belirtilen standartın üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

Güç faktörünün sinüsoidal durumlarda ve nonsinüsoidal durumlarda ele alınması daha doğru sonuç elde edilmesi açısından önemlidir.

PF kavramı, bir yükün bir AC güç sisteminden aldığı akımı ne kadar verimli kullandığını ölçme ihtiyacından kaynaklanmıştır. Doğrusal yüke sahip güç sisteminde yükteki voltaj ve akım denklem 1 ve denklem 2'deki verildiği gibidir [11].

$$v(t) = v_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \delta_1) \quad (1)$$

$$i(t) = i_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \theta_1) \quad (2)$$

Denklem 1 ve denklem 2'de bulunan  $V_1$  ve  $I_1$ , 50/60 Hz voltaj ve akımın tepe değerleridir ve  $\delta_1$  voltajın faz açısıdır,  $\theta_1$  akımın faz açısıdır. Yükteki gerçek PF, P'nin S'ye oranı olarak denklem 3'te belirtildiği gibi tanımlanabilir [11].

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Tamamen sinüsoidal durum ise denklem 4'deki gibi yazılabilir [11].

$$PF = dPF = \frac{P}{S} = \cos(\delta_1 - \theta_1) = \cos\varphi \quad (4)$$

Denklem 4'te  $\varphi$ , PF açısı olarak bilinir. Sinüsoidal durumda, voltaj ve akım arasında yalnızca bir faz açısı vardır. Çünkü gerçek PF ve dPF birbirine eşittir. Öte yandan dPF, gerilim ve akımın temel bileşenleri arasındaki açının kosinüsü olarak tanımlanır. Yalnızca temel frekans mevcut olduğundan; güç faktörü, gerilim ve akımın temel bileşenleri arasındaki faz açısının kosinüsü olarak hesaplanabilir ve genellikle dPF olarak adlandırılır. Doğrusal olmayan bir yük ile akım, elektrik çevrimi başına birden çok kez meydana gelebilecek darbeler halinde şebekeden çekilir. Doğrusal olmayan yükler, orjinal akım frekansına ek olarak daha yüksek frekanslarda harmonik akımlar oluşturur.

Şebeke voltajlarının ve akımlarının harmonikler içerdiği sinüsoidal olmayan durumları değerlendirecek olursak; bazı harmonikler trafonun doyumunda çalışması sonucu, bazı harmonikler ise ayarlanabilir hız sürücüler ve doğrultucular gibi güç elektroniği yükleri tarafından üretilir. Önemli

harmonikler temel seviyenin üzerinde, yani 50 Hz frekanslı temel harmoniğin 3., 5., 7., 9., 11. ve 13. katları şeklindedir. Bir sistemde harmonikler mevcut ise bu durum Fourier serisine genişletilen bozuk bir periyodik akım veya voltaj dalga biçimi denklem 5 ve denklem 6'daki gibi ifade edilir [11].

$$v(t) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(k\omega_0 t + \delta_k) \quad (5)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (6)$$

Gerilim ve akım rms değerleri ise (denklem 7-8) [11];

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_{krms}^2} \quad (7)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{2}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{krms}^2} \quad (8)$$

Şeklinde yazılabilir. Harmonik seviyelerinin sık kullanılan bir ölçüsü, harmoniklerin rms değerinin temel frekans rms değerine oranı olan THD'nın % değeri gerim ve akım için (denklem 9-10) [11];

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_{krms}^2}}{V_{1rms}} \cdot \%100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \cdot \%100 \quad (9)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{krms}^2}}{I_{1rms}} \cdot \%100 = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \cdot \%100 \quad (10)$$

Olarak hesaplanır. Denklem 9 ve 10'da görüldüğü gibi THD, akım ve gerilim harmoniklerin rms değerlerinin toplamının, temel bileşen rms değerine oranıdır ve yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, tam bir sinüs dalga şeklinden, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin sapmasını belirlemede kullanılır. Harmonik bileşenlerin olmadığı durumlarda yani sadece temel frekanstan meydana gelen tam bir sinüs dalga şekli için THD<sub>I</sub> ve THD<sub>V</sub> değerleri sıfırdır. Son yıllarda lineer olmayan yüklerdeki artışın bir sonucu olarak, elektrik sistemlerinde harmoniklerin etkisini hesaba katmak ve bozulma faktörünün etkisini dahil etmek zorunluluğu doğmuştur.

Harmonikler mevcut olduğunda, S yalnızca P ve reaktif güçten (Q) oluşmaz. Bozulma gücünü (D) hesaba katmak için denklem 11'deki gibi hesaplanır [16].

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (11)$$

Harmoniklerin bulunmadığı devrelerde PF,  $\cos \varphi$ 'ye eşit iken, harmonikli devrelerde ise güç faktörü  $\cos \varphi$ 'den farklıdır. Harmoniklerin mevcut olması durumunda gerçek PF, dPF ve bozulma güç faktörünün (distortion power factor-distortion PF) bir ürünü olarak ifade edilir.

Hem sinüsoidal hem de sinüsoidal olmayan durumlar için geçerli olan PF ya da toplam güç faktörü denklem 12'deki gibi tanımlanır [16].

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{1+THD_i^2}\right)} = \cos\varphi \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{1+THD_i^2}\right)} = dPF \cdot \text{distortion PF} \quad (12)$$

Denklem 12'de,  $\cos\varphi$  yer değiştirme güç faktörünü,  $THD_v$  gerilimdeki toplam harmonik bozulmayı,  $THD_i$  akımdaki toplam harmonik bozulmayı, toplam aktif güç P'yi, distortion PF bozulma güç faktörünü ya da harmonik güç faktörünü, toplam görünür güç S'yi ve  $S_1$  ise temel frekanstaki görünür gücü ifade etmektedir.

dPF, akım ve gerilim arasındaki faz kayması nedeniyle gerçek gücün görünen güce oranıdır. Sinüsoidal bozulma bulunmayan durumlarda dPF, PF ile aynıdır. dPF denklem 13'deki gibi hesaplanır [16].

$$dPF = \text{displacement power factor} = \frac{P}{S} = \cos(\delta_1 - \theta_1) = \cos\varphi \quad (13)$$

Denklem 13'de,  $\delta_1$  voltajın faz açısıdır,  $\theta_1$  akımın faz açısıdır;  $\varphi$  ise güç faktörü açısıdır.

Bozulma PF, gerçek rms akımına bölünen temel akım olarak tanımlanır. Bozulma PF, genel olarak  $THD_i$  ve  $THD_v$ 'ye bağlıdır. Bozulma PF, bir yük akımının harmonik bozulmasının, yüke aktarılan gücün verimini ne kadar azalttığıнын bir ölçüsüdür. Harmonik güç faktörü ya da diğer ismiyle bozulma PF denklem 14'deki gibi yazılabilir [16].

$$\text{distortion PF} = \frac{1}{\left(\sqrt{1+THD_v^2} \sqrt{1+THD_i^2}\right)} = \frac{V_{1rms}}{V_{rms}} \cdot \frac{I_{1rms}}{I_{rms}} = \frac{S_1}{S} \quad (14)$$

Denklem 14'te THD gerilim ve akımın toplam harmonik bozulmasıdır.

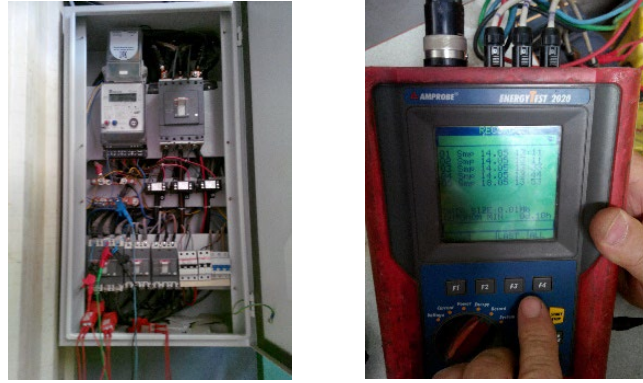
$THD_v < \%5$  ve  $THD_i > \%40$  olduğu durumlarda, denklem 15'de görüldüğü üzere yalnızca  $THD_i$ 'ya bağlıdır [17].

$$PF \approx \frac{1}{\left(\sqrt{1+THD_i^2}\right)} \cdot \cos\varphi \quad (15)$$

Toplam PF'yi iyileştirmek için bir araya gelen iki eleman vardır. dPF'yi etkileyen endüktif veya kapasitif yükler ve bozulma PF'yi etkileyen doğrusal olmayan yüklerin harmonik akımlarıdır. Bu nedenle, bir sistemdeki harmonik akımları, sistemin toplam PF'sini etkilemektedir.

dPF için, bir fazda gerilim ve akımın sıfır geçişi arasındaki örnekleme sürelerinin sayısını saymak gerekir. dPF ve bozulma PF bilindiğinde, toplam PF hesaplanabilir [18].

Çalışmada, modern bir un üretim tesisinde bulunan değirmenlerde ve cam sanayisinde güç analizörü ile ölçümler yapılmıştır. Güç kalitesi parametreleri Amprobe Energy Test güç analizörü ile ölçülmüştür. Güç analizörü, akım ve gerilim harmonikleri ile P, Q ve S'nin analizini üç faz olarak yapabilen ölçüm cihazıdır. Şekil 2'de, gerilim (U), akım (I), S, P, Q, %THD<sub>I</sub> ve %THD<sub>V</sub>, PF ve dPF değerlerinin ölçümü ile ilgili görseller görülmektedir. Ayrıca un üretim tesisindeki gerilim ve akım grafiğinin yanısıra harmonik spektrumu da verilmiştir. Sistemin çektiği akımın harmonik spektrumu güç analizörü ile elde edilen karakteristikler, güç analizörünün sürücüsü yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılarak bu şekilde daha ayrıntılı bir inceleme imkânı elde edilmiştir.



Şekil 2. Güç analizörü ile un değirmenlerinde ve cam sanayisinde yapılan ölçüm

Ölçüm sonuçları IEEE 519-2014 harmonik standartları ile değerlendirilmiştir. IEEE 519-2014 harmonik standardında harmonik bozulmayı değerlendirmek için akım ve gerilim harmoniklerine limitler getirilmiştir. Mevcut harmonik standartlar,  $I_{sc}/I_L$  oranı ile belirlenir.  $I_{sc}$ , PCC'de normal yük çalışma koşulları altında (Ortak Kuplaj Noktası) veya ölçüm noktasında mevcut olan maksimum kısa devre akımıdır,  $I_L$  ise maksimum talep yük akımı (temel frekans bileşeni)'dir. IEEE 519-2014 standardı gerilim ve akım için Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Gerilim için harmonik bozulma sınırları [19]

PCC'de bara gerilimi V	Tekil Harmonik Büyüklüğü %	(Toplam Harmonik Distirsiyonu) THD (%)
$V \leq 1kV$	5.0	8.0
$1 < V \leq 69kV$	3.0	5.0
$69 < V \leq 161kV$	1.5	2.5
$161kV < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Yüksek voltajlı sistemler, nedeni gelecekteki kullanıcıların bağlanabileceği ağdaki noktalarda etkileri azalacak bir HVDC terminali olduğunda % 2.0 'a kadar THD'ye sahip olabilir.

Çizelge 2. 120 V ile 69 kV arasında derecelendirilen sistemler için akım bozulma limitleri [19]

I <sub>L</sub> yüzdesi olarak maksimum 224armonic akım bozulması						
Bireysel 224armonic sıra (tek harmonikler) <sup>a, b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THD

<20°	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	<b>15.0</b>
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	<b>20.0</b>

<sup>a</sup>Çift harmonikler, yukarıdaki tek 225armonic limitlerinin %25'i ile sınırlıdır.  
<sup>b</sup>Bir dc ofsetiyle sonuçlanan mevcut bozulmalara, örneğin yarım dalga dönüştürücülere izin verilmez.  
<sup>c</sup>Tüm güç üretim ekipmanı, gerçek  $I_{sc}/I_L$  'den bağımsız olarak bu akım bozulma değerleriyle sınırlıdır.

Çizelge 2. Devamı

### 3. Araştırma ve Bulgular

Cam sanayisinde ve modern bir un üretim tesisinde bulunan değirmenlerde gerçekleştirilen ölçümlerde üç faz için elde edilen temel güç parametre ve harmonik bozulma değerleri Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelgelerden de görüldüğü üzere ölçüm yapılan tesislerde %THD<sub>1</sub> değerleri IEEE 519-2014 harmonik standartını aşmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde un üretim tesisinde dPF değeri ile PF değeri arasındaki en büyük fark 0.529 ve 0.527'dir. Bu değerler %THD<sub>1</sub> değeri %187.373 ve %238.192 iken ölçülmüştür. En küçük fark ise 0.041'dir ve %THD<sub>1</sub> değeri %28.987 iken ölçülmüştür. Çizelge 6 incelendiğinde ise cam sanayi tesisinde dPF değeri ile PF değeri arasındaki en büyük fark 0.244'dür ve bu değer %THD<sub>1</sub> değeri %86.712 iken ölçülmüştür. En küçük fark ise 0.079'dur ve %THD<sub>1</sub> değeri %41.368 iken ölçülmüştür.

Çizelge 3. Un üretim tesisinde birinci fazda ölçülen temel güç ve harmonik değerleri

Parametreler / Değirmenler	Değirmen 1	Değirmen 2	Değirmen 3	Değirmen 4	Değirmen 5
V <sub>rms</sub> (V)	225.738	226.949	226.703	226.473	226.352
U <sub>12</sub> (V)	390.922	393.754	394.037	373.775	393.139
I <sub>rms</sub> (A)	48.967	40.091	20.210	37.605	41.933
P (W)	10112	5727	2199	5150	5827
S (VA)	11054	9099	4582	8516	9492
Q (Var)	4465	7070	4019	6783	7493
dPF (displacement power factor)	0.967	1.000	1.000	1.000	0.999
PF (power factor)	0.915	0.629	0.480	0.605	0.614
THD <sub>1</sub> (%)	33.841	123.271	180.068	132.097	128.761
THD <sub>v</sub> (%)	-	-	-	-	-

Çizelge 4. Un üretim tesisinde ikinci fazda ölçülen temel güç ve harmonik değerleri

Parametreler / Değirmenler	Değirmen 1	Değirmen 2	Değirmen 3	Değirmen 4	Değirmen 5
V <sub>rms</sub> (V)	227.496	226.625	227.038	226.837	226.869
U <sub>23</sub> (V)	392.802	391.586	392.144	391.784	391.891
I <sub>rms</sub> (A)	47.967	15.235	15.536	16.523	14.197
P (W)	9971	1606	1975	1743	1575
S (VA)	10674	3453	3527	3748	3221
Q (Var)	3811	3057	2922	3318	2810

dPF (displacement power factor)	0.986	0.994	0.998	0.988	0.995
PF (power factor)	0.934	0.465	0.56	0.465	0.489
THD <sub>i</sub> (%)	33.186	187.373	148.992	185.526	176.075
THD <sub>v</sub> (%)	-	-	-	-	-

Çizelge 4. Devamı

Çizelge 5. Un üretim tesisinde üçüncü fazda ölçülen temel güç ve harmonik değerleri

Parametreler / Değirmenler	Değirmen 1	Değirmen 2	Değirmen 3	Değirmen 4	Değirmen 5
V <sub>rms</sub> (V)	225.279	226.651	227.340	227.057	227.331
U <sub>13</sub> (V)	391.256	392.685	393.396	392.689	393.532
I <sub>rms</sub> (A)	53.765	13.384	14.423	15.123	13.234
P (W)	11.387	976	1076	1148	1025
S (VA)	12112	3033	3279	3434	3009
Q (Var)	4129	2872	3097	3236	2829
dPF (displacement power factor)	0.981	0.849	0.847	0.845	0.847
PF (power factor)	0.940	0.322	0.328	0.334	0.341
THD <sub>i</sub> (%)	28.987	238.192	230.865	224.052	220.291
THD <sub>v</sub> (%)	-	-	-	-	-

Çizelge 6. Cam sanayisinde üç fazda ölçülen temel güç ve harmonik değerleri

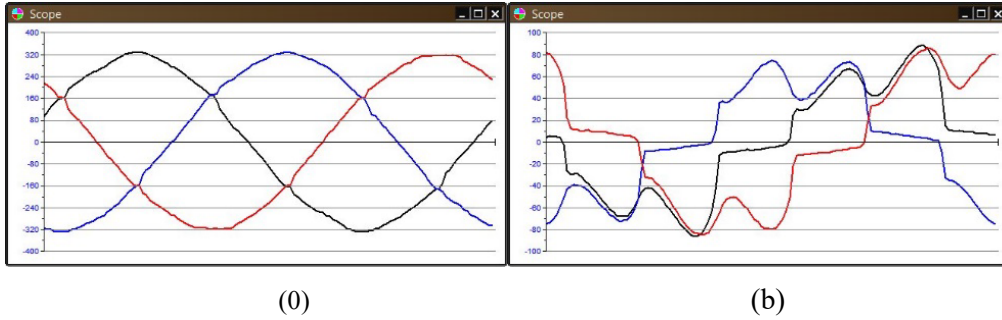
Cam Sanayi Ölçüm	Ölçüm1 Faz 1	Ölçüm1 Faz 2	Ölçüm1 Faz 3	Ölçüm2 Faz 1	Ölçüm2 Faz 2	Ölçüm2 Faz 3	Ölçüm3 Faz 1	Ölçüm3 Faz 2	Ölçüm3 Faz 3
V <sub>rms</sub> (V)	224.350	224.106	222.605	224.723	224.150	222.257	227.276	226.637	209.244
U <sub>12</sub> (V)	388.589	387.718	385.979	388.180	387.193	387.027	386.504	381.387	380.411
I <sub>rms</sub> (A)	14.331	14.335	13.781	14.702	14.226	13.927	50.630	48.683	46.824
P (W)	2439	2411	2279	2490	2372	2299	10463	9734	8768
S (VA)	3215	3213	3068	3304	3189	3098	11507	11033	9798
Q (Var)	2095	2123	2053	2171	2131	2076	4790	5194	4371
displacement power factor (dPF)	0.990	0.979	0.983	0.988	0.980	0.986	0.988	0.965	0.980
power factor (PF)	0.759	0.750	0.743	0.754	0.744	0.742	0.909	0.882	0.895
THD <sub>i</sub> (%)	82.881	82.784	85.369	83.847	84.945	86.712	41.360	42.961	43.730
THD <sub>v</sub> (%)	-	-	-	-	-	-	2.030	2.266	2.353

Modern bir un üretim tesisinde bulunan değirmenlerde gerçekleştirilen üç faz ölçümlerin parametreleri Şekil 3, 6, 9, 12, 15'de görülmektedir. Şekil 4, 7, 10, 13, 16 (a)'da gerilim dalga şekli ve (b)'de akım dalga şekli görülmektedir. Şekil 5, 8, 11, 14, 17'de ise ifade edilen ölçümlerin akım için harmonik spektrumu görülmektedir.

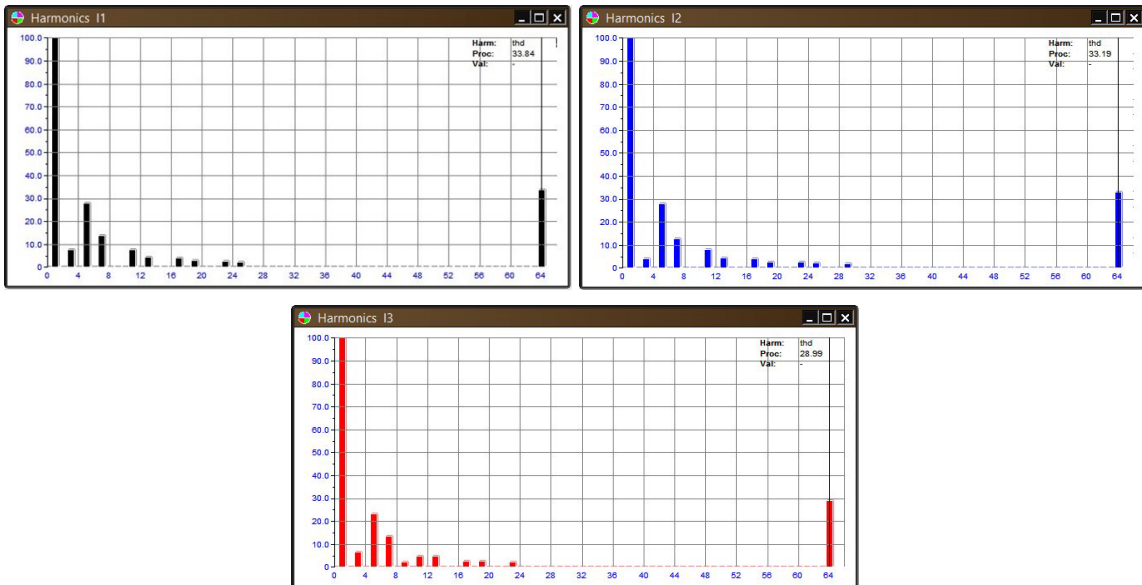


1st phase		2nd phase		3rd phase	
Ursm	UI_12	Ursm	UI_23	Ursm	UI_13
225.738	390.922	227.496	392.802	225.279	391.256
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	11.054	0	10.674	0	12.112
I_rsm	P(kW)	I_rsm	P(kW)	I_rsm	P(kW)
48.967	-10.112	46.921	9.971	53.765	11.387
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i
33.841	-4.465	33.186	3.811	28.987	4.129
Pf i	dPf	Pf i	dPf	Pf i	dPf
0.915	0.967	0.934	0.986	0.940	0.981
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot i	I null	
11.77	3.48	11.25	0.96	98.63	

Şekil 3. Güç analizörü ile değirmen 1'de üç faz ölçüm değerleri



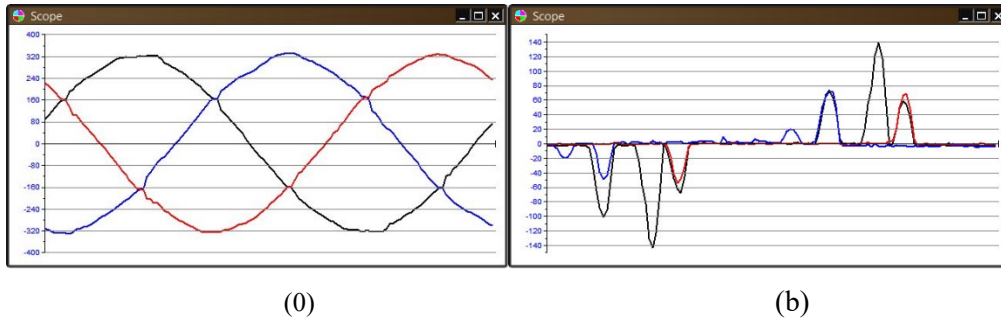
Şekil 4. Güç analizörü ile değirmen 1'de ölçülen üç faz (a) gerilim dalga şekli ve (b) akım dalga şekli



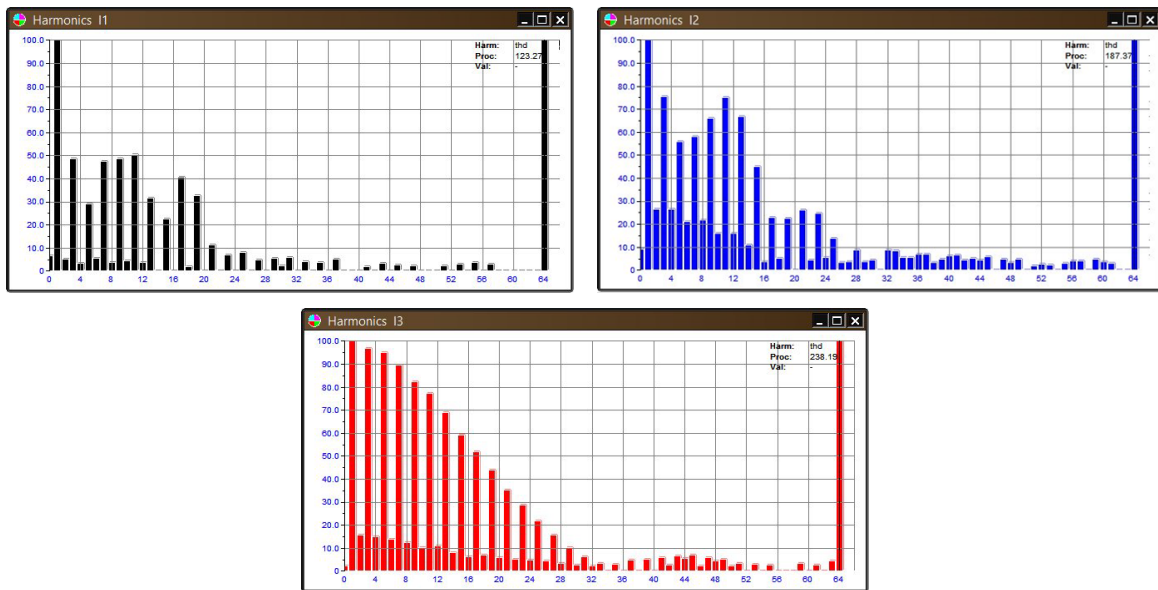
Şekil 5. Güç analizörü ile değirmen 1'de ölçülen her bir faz için akım harmonik spektrumu

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Ursm	UI_12	Ursm	UI_23	Ursm	UI_13
226.949	393.754	226.625	391.586	226.651	392.685
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	9.099	0	3.453	0	3.033
I <sub>rsm</sub>	P(kW)	I <sub>rsm</sub>	P(kW)	I <sub>rsm</sub>	P(kW)
40.091	-5.727	15.236	1.606	13.384	0.976
thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) c
123.271	7.070	187.373	3.057	238.192	-2.872
Pf c	dPf	Pf i	dPf	Pf c	dPf
0.629	1.000	0.465	0.994	0.322	0.849
Total info					
Stot(kW)	Q <sub>tot</sub> (kVAR)	P <sub>tot</sub> (kW)	P <sub>tot</sub> c	I <sub>null</sub>	
7.91	7.26	-3.14	0.40	53.29	

Şekil 6. Güç analizörü ile değirmen 2'de üç faz ölçüm değerleri



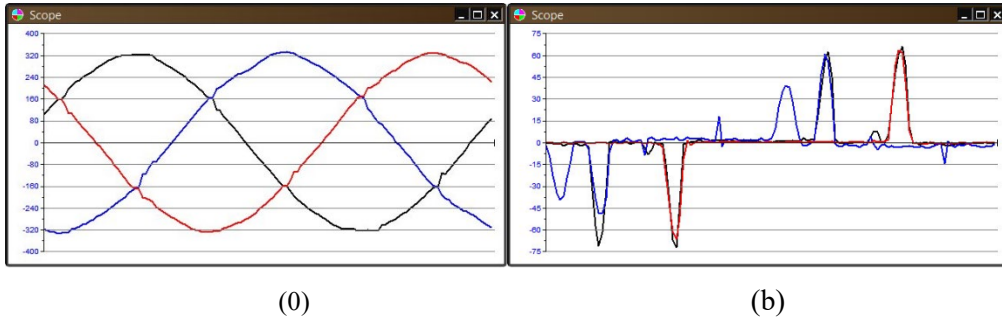
Şekil 7. Güç analizörü ile değirmen 2'de ölçülen üç faz (a) gerilim dalga şekli ve (b) akım dalga şekli



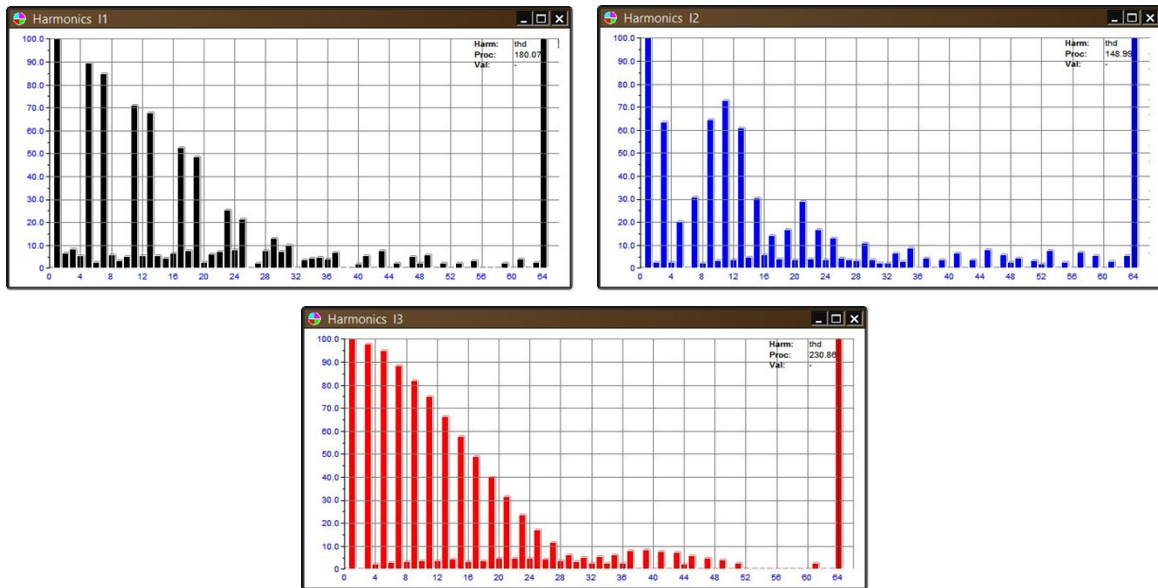
Şekil 8. Güç analizörü ile değirmen 2'de ölçülen her bir faz için akım harmonic spektrumu

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Ursm	UI_12	Ursm	UI_23	Ursm	UI_13
226.703	394.037	227.038	392.144	227.340	393.336
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	4.582	0	3.527	0	3.279
Irm	P(kW)	Irm	P(kW)	Irm	P(kW)
20.210	-2.199	15.536	1.975	14.423	1.076
thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) c
180.068	4.019	148.992	2.922	230.865	-3.097
Pf c	dPf	Pf i	dPf	Pf c	dPf
0.480	1.000	0.560	0.998	0.328	0.847
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot i	I null	
3.94	3.84	0.85	0.22	39.63	

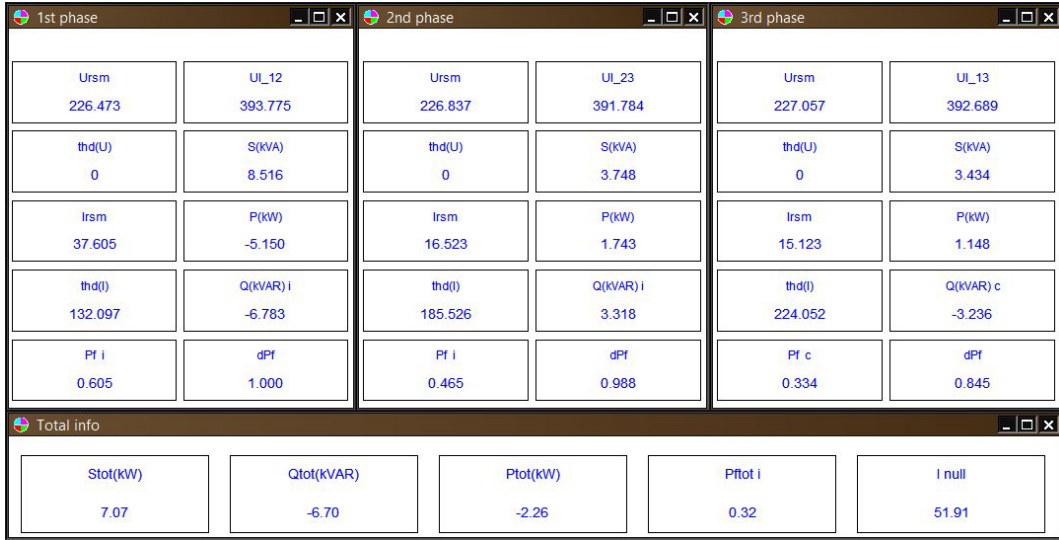
Şekil 9. Güç analizörü ile değirmen 3'de üç faz ölçüm değerleri



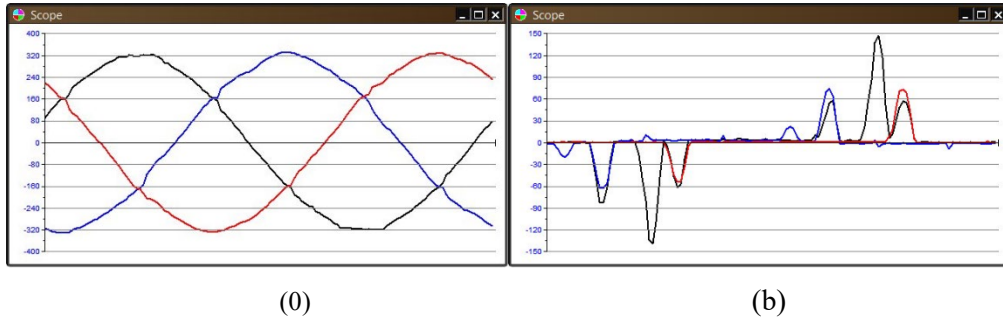
Şekil 10. Güç analizörü ile değirmen 3'de ölçülen üç faz (a) gerilim dalga şekli ve (b) akım dalga şekli



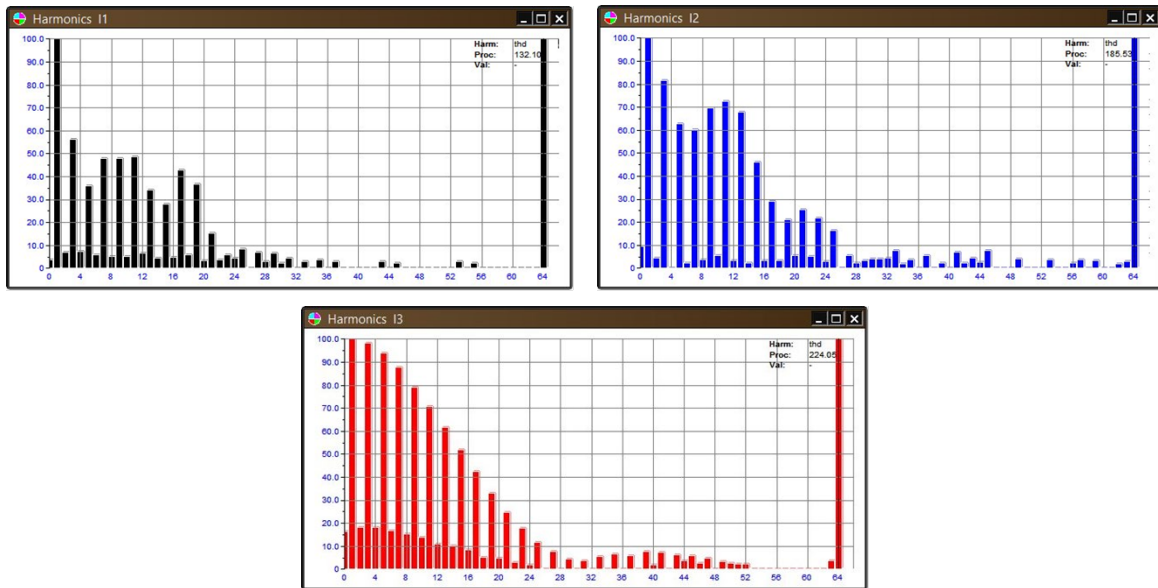
Şekil 11. Güç analizörü ile değirmen 3'de ölçülen her bir faz için akım harmonik spektrumu



Şekil 12. Güç analizörü ile değirmen 4'de üç faz ölçüm değerleri



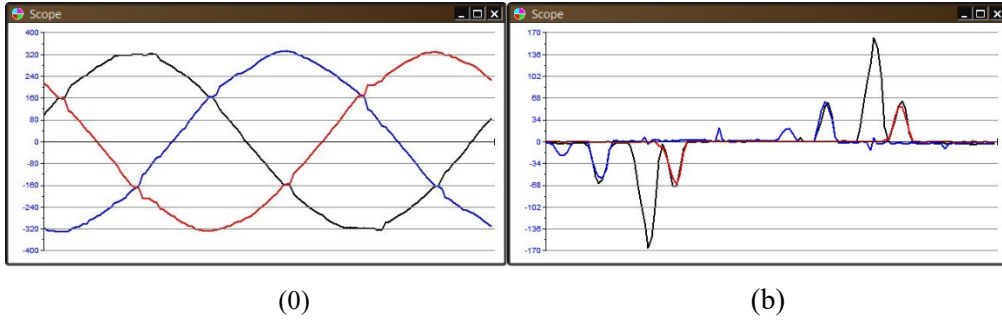
Şekil 13. Güç analizörü ile değirmen 4'de ölçülen üç faz (a) gerilim dalga şekli ve (b) akım dalga şekli



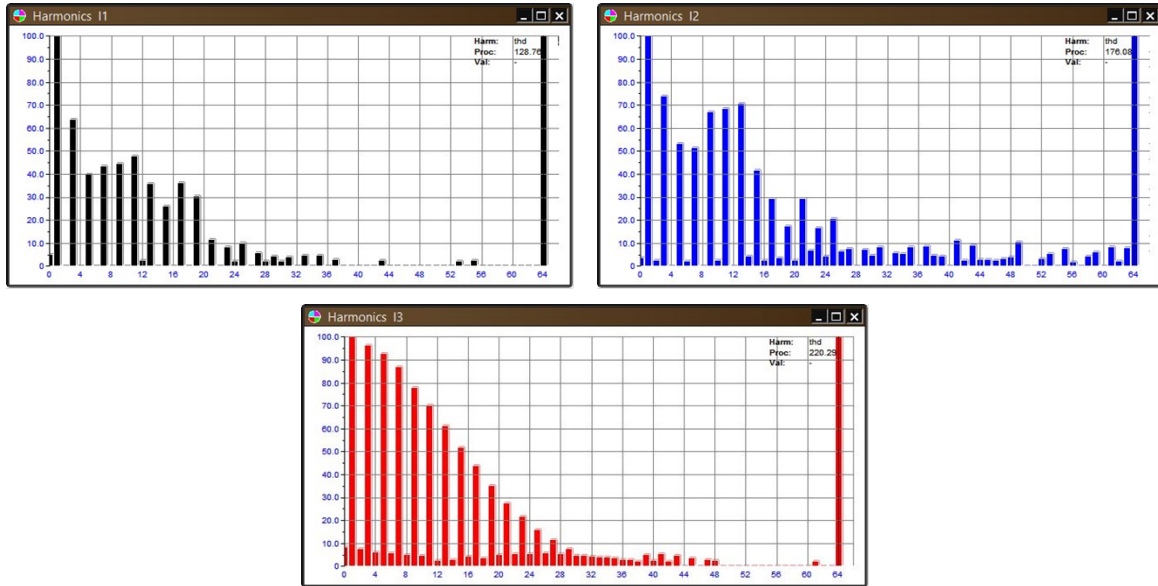
Şekil 14. Güç analizörü ile değirmen 4'de ölçülen her bir faz için akım harmonik spektrumu

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Ursm	UI_12	Ursm	UI_23	Ursm	UI_13
226.352	393.139	226.869	391.891	227.331	393.532
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	9.492	0	3.221	0	3.009
I_rsm	P(kW)	I_rsm	P(kW)	I_rsm	P(kW)
41.933	-5.827	14.197	1.575	13.234	1.025
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) c
128.761	-7.493	176.075	2.810	220.291	-2.829
Pf i	dPf	Pf i	dPf	Pf c	dPf
0.614	0.999	0.489	0.995	0.341	0.847
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot i	I null	
8.18	-7.51	-3.23	0.39	52.87	

Şekil 15. Güç analizörü ile değirmen 5'de üç faz ölçüm değerleri



Şekil 16. Güç analizörü ile değirmen 5'de ölçülen üç faz (a) gerilim dalga şekli ve (b) akım dalga şekli



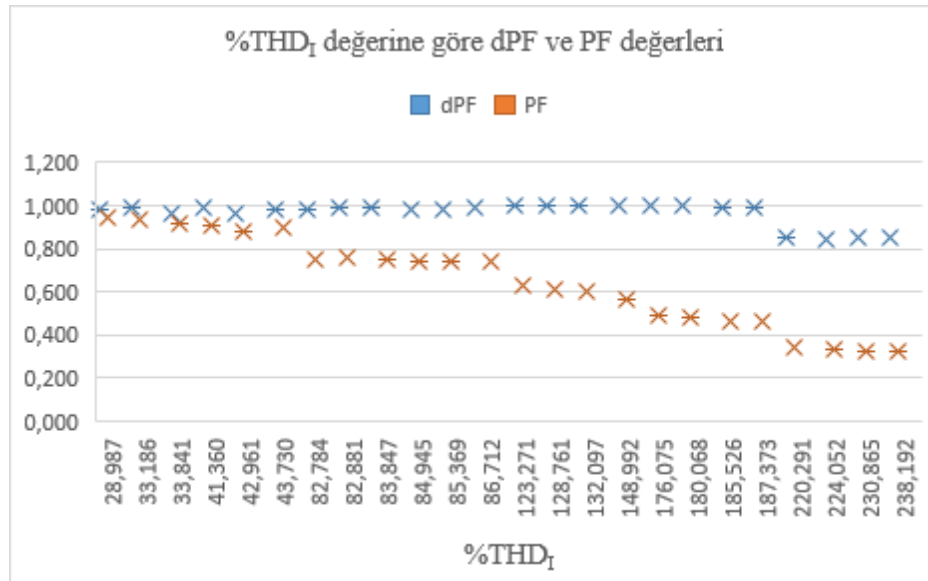
Şekil 17. Güç analizörü ile değirmen 5'de ölçülen her bir faz için akım harmonik spektrumu



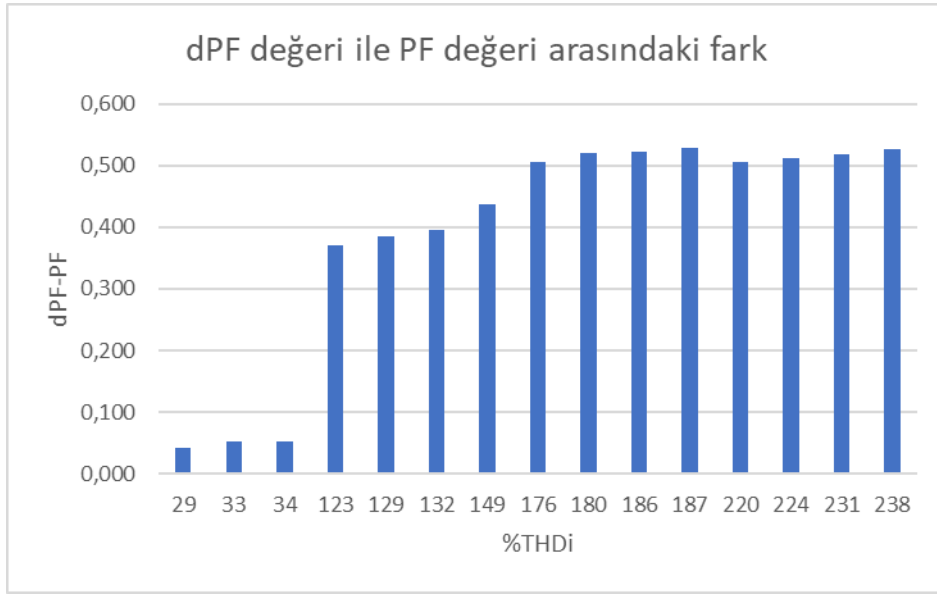
Çizelge 7'deki değerler göz önüne alındığında %THD<sub>1</sub> değerine bağlı olarak, Şekil 18'de dPF ile PF değerlerinin grafiği ve Şekil 19'da ise dPF değeri ile PF değeri arasındaki farkın grafiği verilmiştir.

Çizelge 7. %THD<sub>1</sub> değerine bağlı olarak dPF değeri ile PF değeri arasındaki fark

Ölçümler	dPF	PF	THD <sub>1</sub> (%)	dPF ile PF Arasındaki Fark
1	0.981	0.940	28.987	0.041
2	0.986	0.934	33.186	0.052
3	0.967	0.915	33.841	0.052
4	0.988	0.909	41.360	0.079
5	0.965	0.882	42.961	0.083
6	0.980	0.895	43.730	0.085
7	0.979	0.750	82.784	0.229
8	0.990	0.759	82.881	0.231
9	0.988	0.754	83.847	0.234
10	0.980	0.744	84.945	0.236
11	0.983	0.743	85.369	0.240
12	0.986	0.742	86.712	0.244
13	1.000	0.629	123.271	0.371
14	0.999	0.614	128.761	0.385
15	1.000	0.605	132.097	0.395
16	0.998	0.560	148.992	0.438
17	0.995	0.489	176.075	0.506
18	1.000	0.480	180.068	0.520
19	0.988	0.465	185.526	0.523
20	0.994	0.465	187.373	0.529
21	0.847	0.341	220.291	0.506
22	0.845	0.334	224.052	0.511
23	0.847	0.328	230.865	0.519
24	0.849	0.322	238.192	0.527



Şekil 18. % THD<sub>1</sub> değerine göre dPF ile PF değerleri



Şekil 19. %THD<sub>1</sub> değerine bağlı olarak dPF değeri ile PF değeri arasındaki fark

[14] nolu çalışmada yapılan ölçüm sonuçları çizelge 8’de görülmektedir. Çizelge 8’de de görüldüğü üzere %THD<sub>1</sub>’nin PF ve DPF üzerinde etkisi bulduğumuz sonuçlara oldukça benzemektedir.

Çizelge 8. %THD<sub>1</sub> değerine bağlı olarak dPF ve PF değerleri ve farkı

Ölçümler	dPF	PF	THD <sub>1</sub> (%)	dPF ile PF Arasındaki Fark
1	0.99	0.62	123.1	0.37
2	0.98	0.56	141.3	0.42
3	0.97	0.46	183.9	0.51

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada harmonik içeren güç sistemlerinde harmoniklerin güç faktörüne olan etkisi, modern bir un tesisinde ve cam sanayisinde ölçümler yapılarak açıklanmıştır. IEEE 519-2014 harmonik standartları ile her iki tesisteki ölçüm sonuçlarını değerlendirdiğimizde ise %THD<sub>1</sub> değerlerinin standartın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde %THD<sub>1</sub> değerinin artmasına bağlı olarak gerçek PF değerinin de azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir ifade ile %THD<sub>1</sub> arttıkça dPF ile PF arasındaki fark da artmaktadır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere güç kalitesinin en önemli parametrelerinden biri olan güç faktörünün, harmoniklerin etkisi nedeniyle azalmasından kaynaklı olarak elektrik enerjisi veriminde de önemli ölçüde bir düşüş olacaktır.

**Kaynaklar**

- [1] Silva, R., P., B., Quadros., R., Shaker, H., R., Silva., L., C., P. Harmonic Interaction Effects on Power Quality and Electrical Energy Measurement System, 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), 27-29 November, Rome, Italy, 2019.
- [2] Zobia, A., F. Comparing Power Factor and Displacement Power Factor Corrections Based on IEEE Std. 18-2002. 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 12-15, Lake Placid, NY, USA, 2004.
- [3] Camui, C., C., Petre, V. and Boicea, V. Power Factor Correction: a Hands-on Introduction for Students, 2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), October 22-23, Iasi, Romania, 2020.
- [4] Apetrei, D., Chicco, G., Neurohr, R., Albu, M., M. and Postolache, P. Power quality monitoring. Data relevance and usefulness, Melecon 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, April 26-28, Valletta, Malta, 2010.
- [5] Olaru, D., Floricau, D. Model Analysis for Sinusoidal Power Factor Corrector. U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 74, Iss. 4, 2012.
- [6] Kutija M. and Pravica L. Electric Power Quantities in the Presence of Harmonics-Case Study. 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), April 25-29, Gliwice, Poland, 2021.
- [7] Blaabjerg, F., Chen, Z., and Kjaer, S., B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.
- [8] Gallo, D., Landi, C., Pasquino, N. and Polese, N. A new methodological approach to quality assurance of energy meters under nonsinusoidal conditions. 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, April 24-27, Sorrento, Italy, 2007.
- [9] Mirabbasi, D., Seifossadat, G. and Heidari, M. Effect of Unbalanced Voltage on Operation of Induction Motors and Its Detection, 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009, November 5-8, Bursa, Turkey, 2009.
- [10] Azzam-Jai, A. and Ouassaid, M. A Multifunctional PV-Based Shunt Active Power Filter Using Neural Network Controller, 2018 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), November 21-23, Rabat, Morocco, 2018.
- [11] Grady, W., M., Gilleskie, R., J. Harmonics And How They Relate To Power Factor, Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), November, San Diego, CA, 1993.
- [12] Turkay, B. Harmonic Filter Design and Power Factor Correction in a Cement Factory. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502), September 10-13, Porto, Portugal, 2001.
- [13] Rauber A. and Bakker P. Adjustable Speed Drive System Comparison VSI And LCI For High Power Applications, 2018 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), September 24-26, Cincinnati, OH, USA, 2018.
- [14] Da Silva R. P. B., Quadros R., Shaker H. R. and da Silva L. C. P. Harmonic Interaction Effects on Power Quality and Electrical Energy Measurement System, 2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT), November 27-29, Rome, Italy, 2019.



- [15] Adak S., Cangi H. and Yılmaz A. S. Doğrusal Olmayan Yüklerde Güç Faktörünün Düzeltilmesi ve Harmonik Bileşenlerin Süzülmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1): 153-164, 2019.
- [16] Wakileh, J. G., *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*, Springer, 1st Edition, New York, 2001.
- [17] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2010.
- [18] Comanescu, M. Estimation of THD, Harmonic Components and Power Factor in Three-Phase Rectifiers, 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 26-28 February, Rome, Italy, 2020.
- [19] IEEE Std 519™-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, Institute of Electrical Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 2014.