

TANIMLANMIŞ VEYA ÖLÇÜLMÜŞ DALGA ŞEKİLLERİ İÇİN BİR HARMONİK ANALİZÖRÜ

Ahmet ALTINTAŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Simav-KÜTAHYA
Tel: 274 5137917, Fax: 274 513 7914, E-mail: a_altintas@dumlupinar.edu.tr

ÖZET

Doğrusal olmayan tüm yükler harmonik üretirler. Doğrusal olmayan yüklere harmonik kompanzasyonu yapmak için, çalışma şartlarında yükün üretebileceği tüm harmonik genliklerinin ve frekanslarının bilinmesi gereklidir. Bu da ancak harmonik analizi ile mümkündür. Bu çalışmada, tanımlanmış veya ölçülmüş dalga şekillerinin harmonik analizini gerçekleştirmek amacıyla, harmonik analizörü olarak kullanılabilir bir paket program geliştirilmiştir. Bilgisayar programında dalga şekillerini tanımlamak için dört temel arabirim kullanılmıştır: mouse, klavye, harici bir paket program (C, Pascal, SimCad, OrCad, vb.) veya bir sayısal osiloskop. Dalga şekli, söz konusu herhangi bir arabirimle kullanıcı tarafından tanımlandıktan sonra, harmonik analizi program tarafından gerçekleştirilir; ve iki ve üç boyutlu analiz sonuçları gerek grafiksel olarak ve gerekse sayısal olarak görüntülenir.

Anahtar kelimeler - Harmonik analizi, Fourier dönüşümleri, Enerji kalitesi.

A HARMONIC ANALYZER FOR DEFINED OR MEASURED WAVEFORMS

ABSTRACT

All non-linear loads generate harmonics. In order to compensate harmonic currents of non-linear loads, the frequency and the amplitudes of harmonics produced from loads at the working conditions should be known. This process is possible only with harmonic analysis. In this study, a package program, which will be used as a harmonic analyzer, has been developed for realizing the harmonic analysis of the defined or measured waveforms. In order to define the waveforms, four-basic interface is employed in the computer program: a mouse, a keyboard, an external package program (such as C, Pascal, SimCad, OrCad) or a digital oscilloscope. After waveform is defined with any interface in question by the user, harmonic analysis is performed by the program, and analysis results expressed in two and three-dimensional space are displayed graphically or numerically.

Keywords - Harmonic analysis, Fourier transforms, Power quality.

I. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan talebin hızla artması, yük türlerinin (mesken, ticari, endüstriyel) çeşitliliği ve yerleşimindeki dağınıklık, özellikle de yarı-iletken teknolojisinin hızla gelişmesi beraberinde bazı sorunları getirmiştir. Elektrik sistemlerinde elektrik enerjisinin kaliteli olması istenir. Kaliteli elektrik enerjisi kısaca, süreklilik, sabit frekans ve sabit genliğe sahip sinüzoidal gerilim ile açıklanabilir. Elektrik sistemlerinde şebeke geriliminin sinüzoidal değişimini bozarak enerjinin kalitesini düşüren en önemli etken, sistemde oluşan harmoniklerdir [1,2]. Doğrusal olmayan yükler şebekeden temel dalga frekansında aktif ve

reaktif akım çekerken çeşitli frekanslarda harmonik dalgaları üretirler. Bu tip yüklerin ürettiği oldukları harmonik dalgaları devrelerini şebekede bulunan yükler üzerinden tamamlar ve başlangıçta saf sinüzoidal olan şebekenin gerilim dalga şeklini bozarlar. Sinüzoidal değişim göstermeyen dalgaların elektrik sistemleri ve sistem elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. Sinüzoidal şekilden ayrılan dalgaların beraberinde getirdiği harmoniklerin mertebesi, çeşitliliği ve genel enerji sistemleri üzerindeki etkinliği yıllar boyunca artarak süregelmiştir. Bu süreç içinde, harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik gerek

kuramsal gerekse çeşitli deneysel yaklaşımlar ortaya konmuştur. Araştırmalar, harmonik üreten yükler, harmonik analize ilişkin matematiksel tanım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmonik alt/üst sınırları, harmoniklerin yok edilmesi veya zayıflatılması gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır [3-6].

Güç elektroniği uygulamalarında anahtarlama elemanı olarak kullanılan transistörler (BJT, IGBT, MOSFET, GTO, vb.), tristörler, triyaklar, vb.nin iletme ve kesime geçmesi sırasında anahtarlama frekansına bağlı olarak harmonikler üretilir. Tristör ve triyak gibi anahtarlama elemanlarının doğasından kaynaklanan en önemli bozucu etki, akım ve gerilim dalga biçimlerinin periyodik olmakla birlikte, şebeke geriliminin sinüzoidal değişimini bozmalarıdır. Güç elektroniği elemanlarına sahip yükler, doğrusal olmayan bir yük karakteristiğine sahiptir ve doğrusal olmayan tüm yükler harmonik üretirler [2,3]. Harmoniklerin sistem ve yükler üzerinde olumsuz etkileri vardır (hat kayıpları, kondansatör ek kayıpları, ek demir kayıpları sonucu aşırı ısınma, rezonans olayları, ek sargı kayıpları, enerji kalitesini düşürme, vb.). Bu olumsuz etkilerin azaltılabilmesi için öncelikle onlara ait gerekli bilginin edinilmesi gereklidir. Bu da ancak harmonik analizi (harmonik spektrumu) ile mümkündür.

Harmonik analizi, bir dalga şeklini (işareti) oluşturan tüm sinüs-kosinüs bileşenlerinin frekanslarını ve genliklerini tespit etme işlemidir. Harmonik analizi, Fourier serileri veya Fourier dönüşümleri ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Harmonik analizinin, güç sistemleri haricinde de birçok uygulama alanı mevcuttur. Güncel uygulamalarda harmonik analizi için Fourier serileri pek kullanılmaz; çünkü Fourier serileri sadece periyodik olan işaretlere uygulanabilir; ayrıca algoritması gereği (integral alma işlemini kullandığı için) yavaş sonuç üretir. Fourier dönüşümleri ise, bilgisayar sistemlerine daha yakın bir algoritma ile hazırlandıkları için daha hızlı çözüm üretir [7,8].

Bilgisayar destekli bir harmonik analizi gerçekleştirebilmek için öncelikle dalga şeklinin tanımlanması gereklidir. Basit dalga şekillerinin tanımlanmasında ciddi bir problem yaşanmaz. Ancak, endüstriyel uygulamalarda açığa çıkan dalga şekilleri periyodik olmayan bir özelliğe veya daha karmaşık bir yapıya sahip olabilir; uygulamalarda trigonometrik, üstel, polinomik, doğrusal ve bunların karışımından oluşan dalga şekilleri mevcuttur. Bu tip dalga şekillerini tanımlamak ve harmonik analizi yapmak için en pratik yöntem, onların fonksiyonlarını kullanmaktır; bu yöntemde, dalga şeklinin veya her bir parçasının fonksiyonu bilinmelidir. Bir dalga şeklinin fonksiyonunu elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda o dalga şeklini tanımlamak için iki yöntem kullanılabilir: a) bir simülasyon paket programı yardımıyla dalga şekli verisini üreterek tanımlamak; b) bir sayısal osiloskop yardımıyla, gerekli veriyi uygulama devresinden ölçme yoluyla olarak tanımlamak.

Bu çalışmada, tanımlanmış veya ölçülmüş dalga şekillerinin harmonik analizini gerçekleştirmek amacıyla, harmonik analizörü olarak kullanılacak bir paket program hazırlanmıştır. Programda öncelikle, analiz edilecek olan basit dalga şekillerinin klavye ve/veya mouse yardımıyla tanımlanmasına ve iki boyutlu (2B) grafik ortamında ifade edilmesine olanak tanınmıştır. Alternatif olarak, fonksiyonu belirli olan dalga şekillerinin de dalga şekli, onların fonksiyonları yardımıyla oluşturulabilmektedir. Bu şekilde de oluşturulamayan karmaşık dalga şekillerinin ise, harici bir paket programdan (Pascal, C, OrCad, SimCad, vb.) veya bir uygulama devresinden (sayısal osiloskop ile) alınan veriler kullanılarak oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen program, diğer bilgisayar programlarıyla etkileşimli olarak çalışabildiği için, başka bir kaynak tarafından uygun biçimde derlenmiş veriyi rahatlıkla alabilmektedir. Dalga şekli verisi yukarıda sayılan her hangi bir yöntemle alındıktan sonra, ayrık zaman fourier dönüşümleri (DFT) kullanılarak dalga şekli verisine harmonik analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda, dalga şeklinin içerdiği harmoniklerin mertebeleri, frekansları, genlikleri, faz açıları hesap edilmiş; ve istenilen sayıdaki harmoniklerin gerek frekans uzayındaki gösterimi ve gerekse zaman gölgesindeki gösterimi 2B grafik ortamında oluşturulmuştur. Bazı dalga şekillerine ait harmoniklerin zaman uzayındaki 2B grafikleri bir takım karışıklıklara sebep olabilir; bunu önlemek için harmonikler ayrıca üç boyutlu (3B) grafik ortamında da ifade edilmiştir. Ek olarak, hesaplanan harmonik genlikleri ve faz açıları yardımıyla, harmoniklerin toplam değerlerinin temel dalgaya olan etkisi 2B ve 3B grafik ortamında gösterilmiştir.

II. FOURIER SERİLERİ VE FOURIER DÖNÜŞÜMLERİ (DFT)

Günümüzde, dalga şekillerinin harmonik analizi için bazı teknikler geliştirilmiştir. Şüphesiz, Fourier serileri bunlar arasından en yaygın olan işaret işleme tekniğidir [7,8]. Fourier serileri kısaca, zaman uzayında ifade edilmiş periyodik bir dalga şeklinin, frekans uzayına dönüşümünü sağlar. Geleneksel olarak harmonik analiz sonuçları 2B düzlemde, x-ekseninde harmonik frekansı/mertebe ve y-ekseninde harmonik genliği alınarak görüntülenir.

Periyodik bir işaret, çeşitli genlik ve frekanstaki birçok sinüs işaretinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu işlem Fourier serisine açılım olarak bilinmektedir. En düşük frekanslı sinüzoidal işaret 1.harmonik (temel dalga), diğerleri ise harmonik bileşenler adını almaktadır. Analiz sonunda a_0 katsayısı ve a_n, b_n seri katsayıları hesaplanarak harmonik genlikleri bulunmuş olur. a_0 sabiti, fonksiyonun ortalama değerine eşittir. n indisi harmonik mertebesini göstermekte olup, a_n ve b_n n .harmonik bileşenleridir.

Bu tanımdan hareketle, temel periyodu T olan bir $f(x)$ fonksiyonu,

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1)$$

şeklinde Fourier serisine açılıp, açılımdaki a_0 , a_n ve b_n katsayıları sırasıyla;

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos nx \, dx \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin nx \, dx \\ a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \, dx \end{aligned} \right\} \quad (n=0,1,2,3,\dots) \quad (2)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanabilir. Eş. (1)'deki a_n , b_n katsayıları ve $f_1 = 1/T$ kullanılarak;

$$\left. \begin{aligned} c_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ f_n &= n \cdot f_1 \end{aligned} \right\} \quad (n \neq 1) \quad (3)$$

eşitlikleriyle tanımlanan c_n ve f_n , sırasıyla aynı frekansa sahip harmoniklerin bileşke genlik değerini ve frekansını verecektir.

Bir fonksiyonun tek veya çift dalga simetrisine sahip olduğunun bilinmesi, o fonksiyona yapılacak olan harmonik analizini kolaylaştırır. Eğer, $f(x) = f(-x)$ ise fonksiyon 'çift simetriye' sahiptir; bu takdirde bütün b_n katsayıları sıfır olacaktır. Şayet, $f(x) = -f(-x)$ ise fonksiyon 'tek simetriye' sahiptir; bu takdirde bütün a_n ve a_0 katsayıları sıfır olacaktır. Pratik olarak, dalga şekli y -eksenine göre simetrik ise çift; orijine göre simetrik ise tek bir fonksiyondur.

Fourier serileri sadece periyodik olan işaretlere uygulanabilmektedir. Periyodik olmayan işaretlerin de harmonik analizinin yapılabilmesi için sayısal işlemci tabanlı Ayırık Fourier Dönüşüm (DFT) yöntemi kullanılmalıdır. Algoritması gereği, DFT yöntemi de Fourier analizi gibi uzun bir zaman almaktadır. Daha sonraki yıllarda dönüşüm süresini kısaltmak için DFT'nin hızlı bir gerçekleştirilmesi olan Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) yöntemi geliştirilmiştir [7,9]. FFT algoritmasının hızlı olması, uygun veri sayısının (2^n) işlenmesi ile sağlanmıştır. Fourier serileri periyodik olan işaretin fonksiyonunu kullanırken, DFT ve FFT yöntemleri periyodik olan veya olmayan işaretin örneklenmiş verilerini kullanmaktadır.

III. MATERYAL VE METOD

Harmonik analizörü olarak geliştirilen yazılım, Matlab® paket programında hazırlanmıştır. Çünkü Matlab programı,

matris tabanlı işlemleri kolayca gerçekleştirebilmesi, veri analizindeki üstün yetenekleri, kullanıcı etkileşimli (interactive) olarak çalışabilmesi, iki ve üç boyutlu birçok hazır grafik fonksiyonlarını içermesi, kullanıcıya hitap edecek olan yeni fonksiyonların tanımlanabilmesi gibi birçok özelliğe sahiptir. Bu çalışma açısından bakıldığında ise, en önemli tercih ediliş sebebi FFT analizi yapabilmeye yeteneğine sahip olmasıdır; ayrıca FFT analizi yaparken assembly kodunu kullanması onun daha hızlı çözüm üretmesini sağlayan diğer bir üstünlüğüdür (Matlab'da, FFT analizi için düzyazı (script) komutları kullanılmayıp, makine kodu kullanılmıştır). Matlab ayrıca gerçel veya karmaşık sayılar üzerinde de kolaylıkla işlem yapabilmektedir; bu özellik FFT için vazgeçilmez bir unsurdur [10,11].

Matlab programında ayırık fourier dönüşümleri fft fonksiyonu ile yapılmaktadır. fft fonksiyonu, veri sayısı uygunsa FFT yöntemini, veri sayısı uygun değilse DFT yöntemini kullanır. Veri sayısının uygunluğu, veri vektörünün sahip olduğu terim sayısının 2^n 'nin herhangi bir pozitif kuvvetine eşit olması anlamına gelmektedir. Ek olarak Matlab programında, ters ayırık fourier dönüşümlerini hesaplamak amacıyla $ifft$ fonksiyonu da tanımlanmıştır. fft ve $ifft$ fonksiyonlarının genel kullanım biçimleri şöyledir: $fft(X)$, $fft(X,n)$, $ifft(X)$, $ifft(X,n)$.

Burada X , veri vektörünü ve n , dönüşümde kullanılacak olan terim sayısını temsil etmektedir. Veri sayısı n , X 'in eleman sayısından büyükse X vektörüne yeteri kadar 0'lar ilave edilir; küçükse X 'in n kadar elemanı kullanılır. Gerçek uygulamalarda veri vektörü X , analog (veya bazen sayısal) bir işaretin belirli zaman aralıklarında örneklenmesi ile elde edilir. Nyquist-Shannon örnekleme teoremine göre örnekleme frekansı, dalga şekli içindeki en yüksek frekansın iki katından büyük olmalıdır. Aksi takdirde örneklenmiş veriden, gerçek dalga şekli geri elde edilemez.

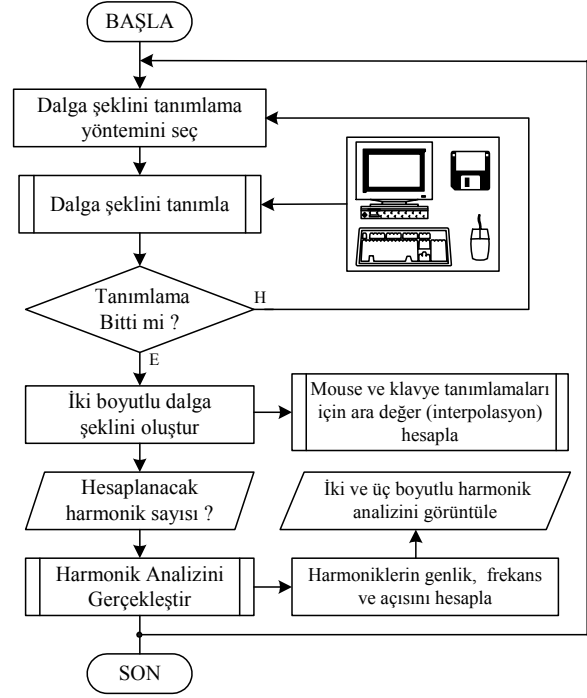
fft fonksiyonu N elemanlı gerçel değerli bir vektöre uygulandığında, birbirinin tümleyeni olan N adet karmaşık sayı üretir (ilk terim hariç). Bu sayıların genliği $N/2$ noktasına göre simetrik değerlere sahiptir. Bu yüzden gerçek harmonik frekansları $N/2$ noktasına kadar geçerlidir. Örnekleme frekansı F_s olarak alınırsa, iki örnekleme arasındaki zaman $1/F_s$ kadar olacaktır; ve harmonik frekansları F_s/N Hertz kadar aralıktır. Diğer bir deyişle, N adet harmonik 0 ile $(N-1)F_s/N$ Hertz arasında düzgün dağılımlıdır [7]. Harmonik genlikleriyle yakından ilgili olan karmaşık sayılar abs komutu yardımıyla gerçel sayı biçiminde; faz açıları da $angle$ komutu yardımıyla radyan cinsinden ifade edilebilir.

Geliştirilen Matlab programının basitleştirilmiş akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre, harmonik analizi yapılacak olan dalga şekli, seçilen bir yöntemle tanımlandıktan sonra iki boyutlu görüntüsü oluşturulmuştur. Bu sayede kullanıcı, oluşturmuş olduğu

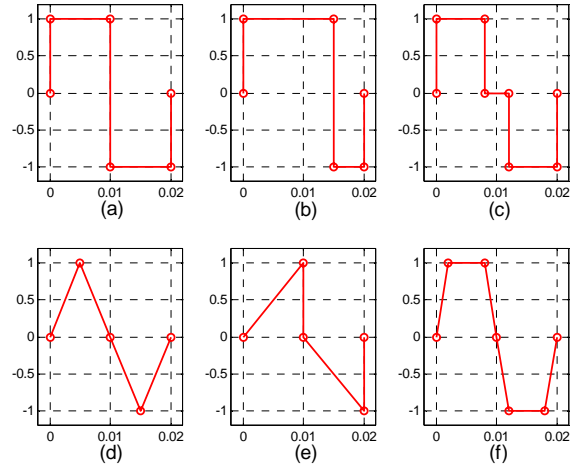
dalga şeklinin doğruluğundan emin olacaktır. Sonra, mouse veya klavye ile tanımlanan dalga şekilleri için aradeğer (enterpolasyon) hesabı yapılmıştır; bu işlem, harmonik analizinin doğruluğunu arttırmak için gerekli olup 1024 veri kullanılmıştır; parçalı fonksiyonlar ile veya harici veri ile oluşturulacak olan dalga şekilleri için ara değer hesabına gerek yoktur. Hesaplanması istenilen harmonik sayısı kullanıcı tarafından girildikten sonra, *fft* analizi yapan alt program çağrılarak harmonik analizi gerçekleştirilir.

Paket program yardımıyla oluşturulan bazı dalga şekilleri Şekil 2,3,4'te verilmiştir. Şekil 2'de verilen dalga şekilleri mouse ile işaretlenen koordinatlar ve/veya klavyeden girilen değerler ile oluşturulmuştur. Örnek olarak, Şekil 2.f'de verilen dalga şekli sırasıyla (0,0), (0.002,1), (0.008,1), (0.01,0), (0.012,-1), (0.018,-1), (0.02,0) koordinatları klavye ile girilerek oluşturulmuştur. Şekil 3'te verilen dalga şekilleri, parçalı fonksiyonlar yardımıyla oluşturulmuştur. Örneğin, Şekil 3.c'deki dalga 90° - 180° ve 270° - 360° aralarında $u(t) = 310\sin(\omega t)$ fonksiyonu ve diğer bölgelerde $u(t) = 0$ fonksiyonu ile oluşturulmuştur.

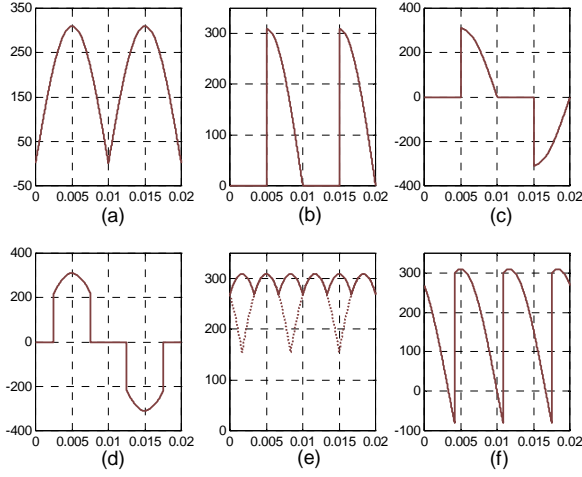
Şekil 3'te verilen dalga şekilleri sırasıyla, çift yönlü doğrultucu çıkışı, 90° tetikleme açısına sahip omik yüklü tristörün çıkış gerilimi, 90° tetikleme açısına sahip omik yüklü triyakin çıkış gerilimi, 45° - 135° arası sektör kontrol çıkışı, 3-fazlı tek yönlü ve çift yönlü doğrultucu çıkışları, 3-fazlı yarım kontrollü köprü tipi dönüştürücü çıkışıdır. Şekil 4.a,b'de verilen dalga şekilleri simülasyon paket programlarından (SimCad, Orcad), Şekil 4.c,d'de verilen dalga şekilleri C programlama dilinden, Şekil 4.e,f'de verilen dalga şekilleri bir sayısal osiloskoptan (Tektronix, TDS3012) elde edilen veriler ile oluşturulmuştur. Şekil 4'ta verilen dalga şekilleri sırasıyla: 10Hz frekansa sahip siklokover-ter çıkışı; histerezis kontrol çıkışı; 1kHz anahtarlama frekansına sahip PWM ac kıyıcı çıkışı; triyak kontrollü RL (10Ω - 50mH) bir yükün akım dalga şekli (tetikleme açısı 90°); tristör kontrollü avara diyotlu RL (10Ω - 100mH) bir yükün akım dalga şekli (tetikleme açısı 90°); çift yönlü doğrultucu, triyak kontrollü omik yük ve çeşitli RLC yüklerinden oluşan karma bir yükün akım grafiğidir.



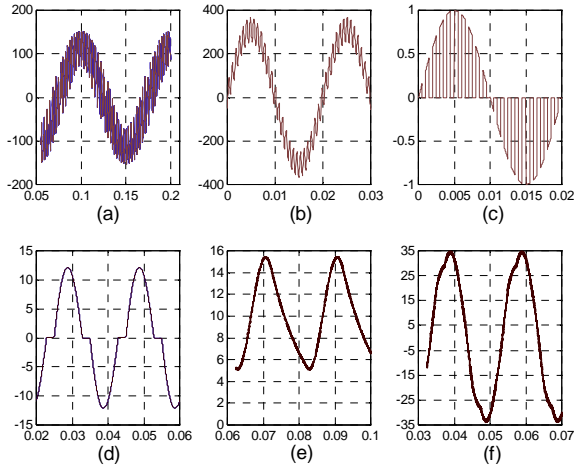
Şekil 1. Program akış diyagramı



Şekil 2. Mouse-klavye ile oluşturulmuş dalga şekilleri



Şekil 3. Parçalı fonksiyonlar ile oluşturulmuş dalga şekilleri



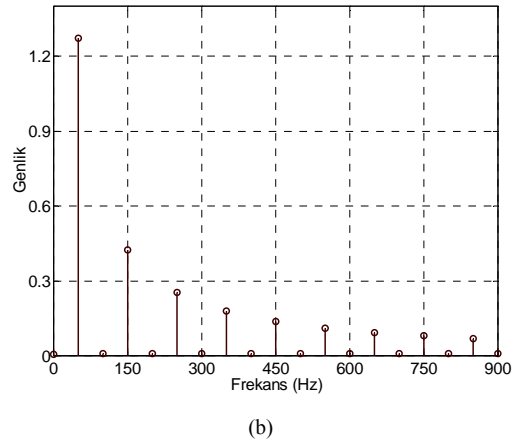
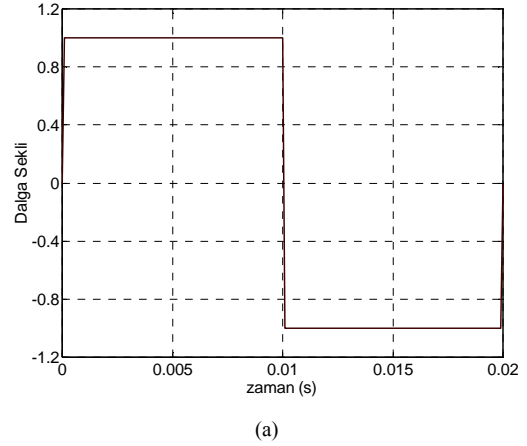
Şekil 4. Harici veriler ile oluşturulmuş dalga şekilleri

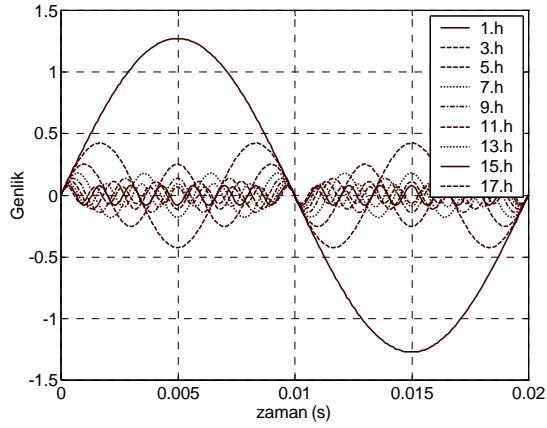
IV. ÖRNEK UYGULAMALAR

Bu konu başlığı altında, geliştirilen Matlab programının kullanımına ilişkin bazı genel örneklere değinilmiş ve program çıktılarında ait iki ve üç boyutlu grafikler verilmiştir. Program çıktı grafikleri sırasıyla, tanımlanmış dalga şeklini, dalga şeklinin 2B harmonik analizini, belirli bir grup harmoniğin zaman uzayındaki 2B gösterimini, aynı grup harmoniğin zaman uzayındaki 3B gösterimini, harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 2B gösterimini ve harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 3B gösterimini temsil etmektedir. Hesaplamalarda kullanılan harmonik mertebeleri 0-18 arasındadır; 0.mertebeden harmonik DC bileşeni temsil etmektedir. Aşağıda verilmiş olan örneklerden birincisi simetrik bir kare dalga ve diğerleri güç elektroniği sistemleri ile ilişkili iki uygulama örneğidir [12-15].

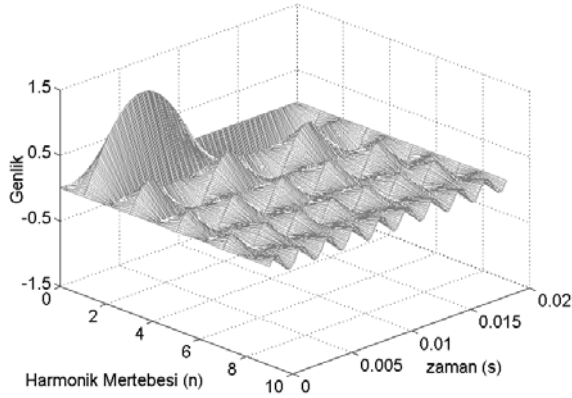
IV.1. Kare Dalga

Fourier serilerine değinen birçok kitapta, harmonik analizi yapılırken kullanılan ilk dalga şekli örneği 'kare dalga' veya benzeri dalga şekilleridir. Bu dalga şekilleri uygulamalarda sıkça kullanılmanın yanında, konunun anlaşılması için de en uygun örneği teşkil etmektedir. Çünkü farklı genlik ve frekanstaki sinüsoidal işaretlerin toplanması ile bir kare dalga oluşturulması yeterince ikna edici ve öğretici bir yöntemdir. Bu örnekte, 50Hz frekansa sahip bir kare dalga, klavye ile koordinatları (6 adet) girilerek kolayca oluşturulmuş ve harmonik analizi yapılmıştır. Elde edilen grafiksel sonuçlar Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5.b'deki grafiğe göre, kare dalganın sadece tek mertebeli ve hızla azalan genlikli harmonikler içerdiği açıkça görülmektedir.

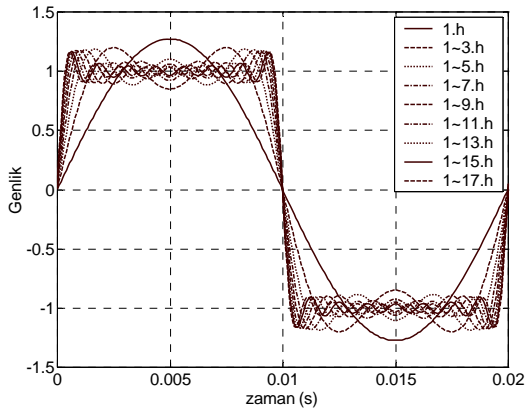




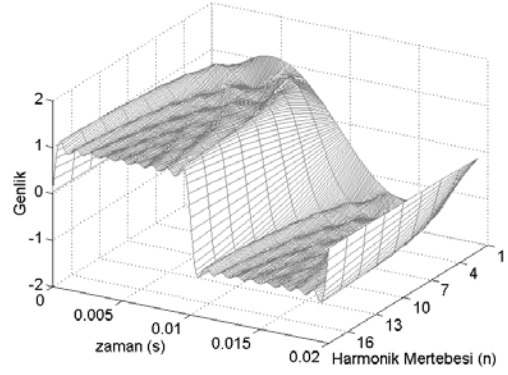
(c)



(d)



(e)

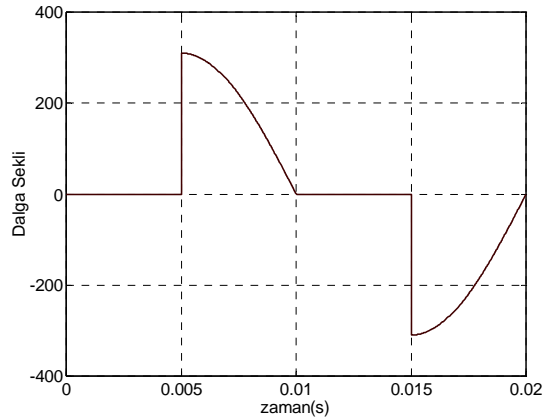


(f)

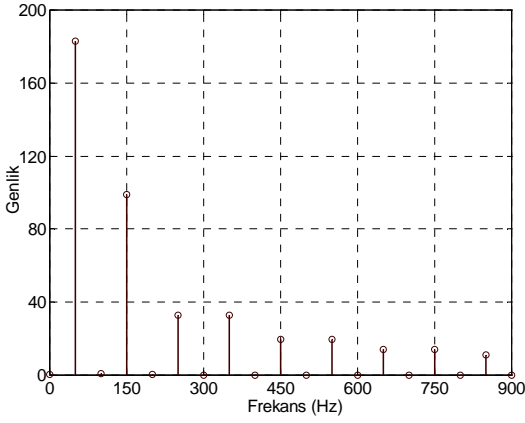
Şekil 5. Simetrik bir kare dalganın harmonik analiz sonuçları, a) Tanımlanmış kare dalga, b) Kare dalganın 2B harmonik analizi, c) Harmoniklerin zaman uzayındaki 2B gösterimi, d) Harmoniklerin zaman uzayındaki 3B gösterimi, e) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 2B gösterimi, f) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 3B gösterimi.

IV.2. Triyak kontrollü omik yük

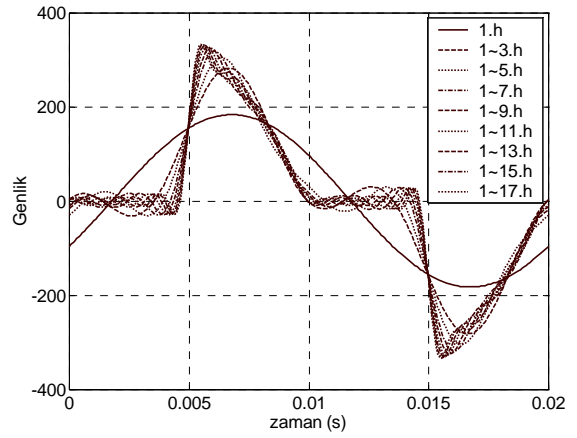
Triyaklar yüksek delinme gerilimleri ve yüksek çıkış akımlarına sahip olduklarından, anahtar ve kontrolcü olarak kullanmak için son derece uygundur. Bu yüzden endüstride, yüksek güçlü enerji dönüşümleri ve sistem kontrolü için sıkça kullanılmaktadır; ısıtma sistemleri, motor sürücü devreleri, ışık karartma devreleri, ac gerilim kıyıcıları, vb. bazı kullanım alanlarındandır [14,15]. Bu örnekte, triyak kontrollü bir ısıtıcının (omik yük) veya bir ışık karartma devresinin dalga şekli incelenmiştir. Triyakın 90° tetikleme açısında, fonksiyon parçaları kullanılarak gerilim dalga şekli oluşturulmuştur. Program yardımıyla üretilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6.b'deki grafiğe göre, triyak kontrollü omik yükün sadece tek mertebeli ve yavaşça azalan genlikli harmonikler içerdiği görülmektedir.



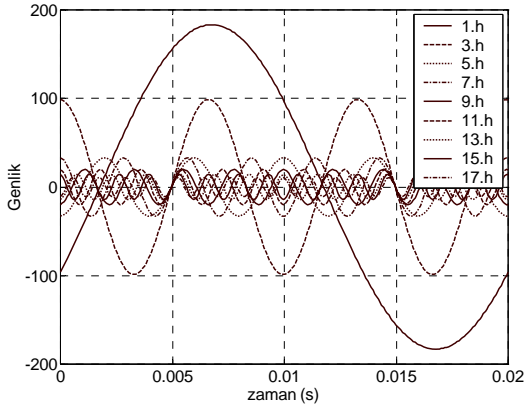
(a)



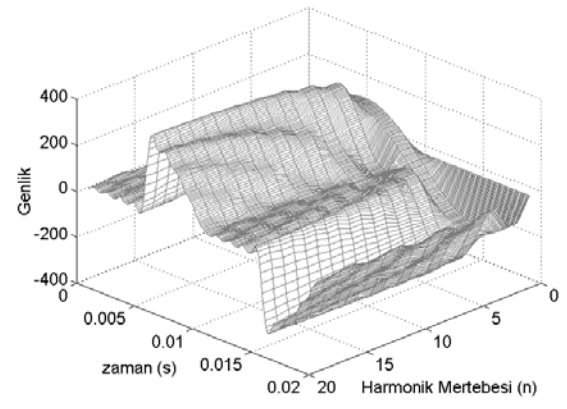
(b)



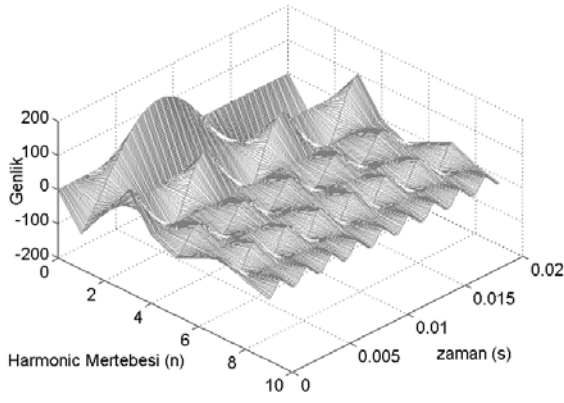
(e)



(c)



(f)

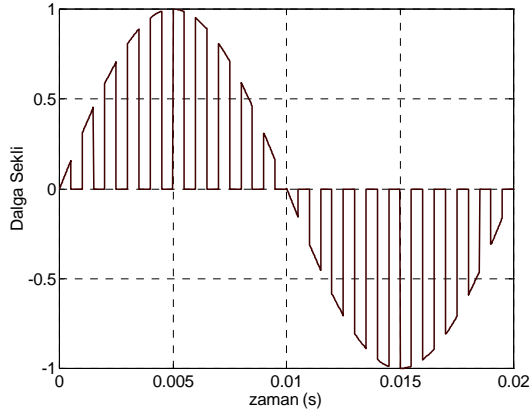


(d)

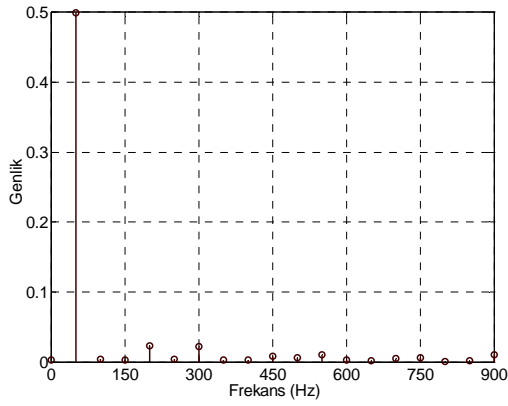
Şekil 6. Triyak kontrollü omik yükün harmonik analiz sonuçları, a) Tanımlanmış dalga şekli, b) Dalga şeklinin 2B harmonik analizi, c) Harmoniklerin zaman uzayındaki 2B gösterimi, d) Harmoniklerin zaman uzayındaki 3B gösterimi, e) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 2B gösterimi, f) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 3B gösterimi.

IV.3. PWM kontrollü AC gerilim kontrolcüsü

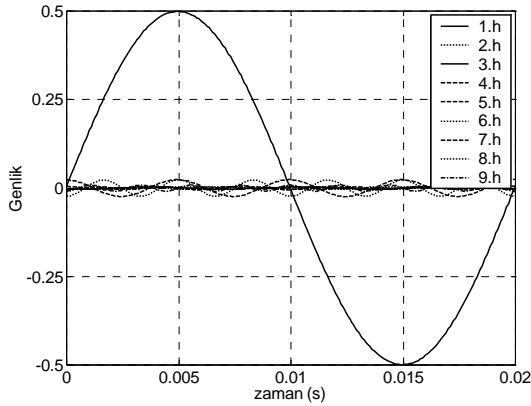
AC/AC dönüştürücüler endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. En basit AC/AC dönüştürücü olan AC gerilim kontrolcüsü, giriş frekansı ile aynı frekansta bir çıkış gerilimini kontrol etme imkânı sunmaktadır. AC gerilim kontrolcüsü de kendi arasında farklı türlere ayrılmaktadır. Bunlar arasında da en az harmonik etkinliğe sahip olan tür ise PWM kontrollü AC gerilim kontrolcüsüdür [2,14]. Bu örnekte, PWM kontrollü AC gerilim kontrolcüsünün dalga şekli, C programlama dili yardımıyla elde edilmiştir. $1kHz$ anahtarlama frekansı ve $1V$ maksimum genliğe sahip AC gerilim kontrolcüsüne ait analiz sonuçları Şekil 7'de verilmiştir (AC gerilim kontrolcüsü PWM anahtarlama frekansına bağlı olarak, anahtarlama frekansının tam katlarında ($2kHz$, $3kHz$, vb) etkin harmonikler içerirler. Yüksek frekansa sahip bu harmonikler, kolayca filtre edilebildikleri için burada dikkate alınmamışlardır).



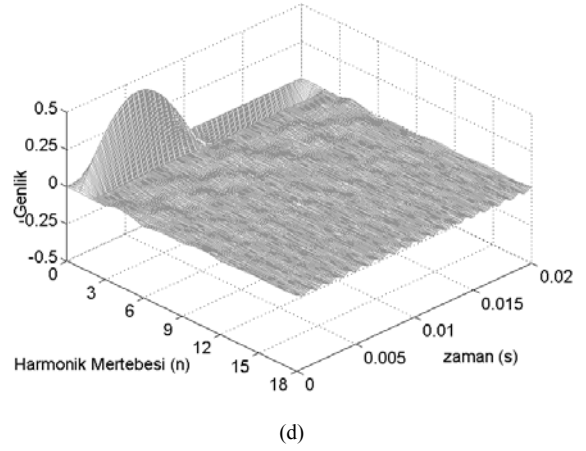
(a)



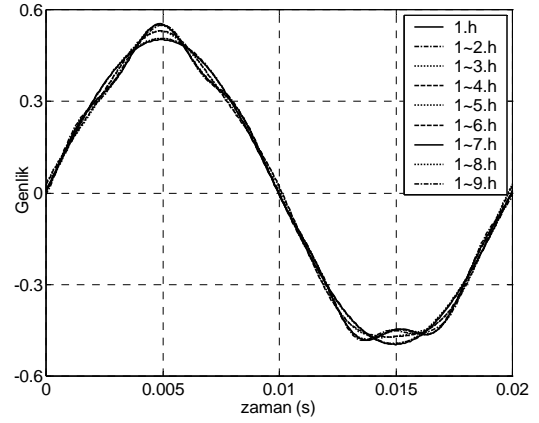
(b)



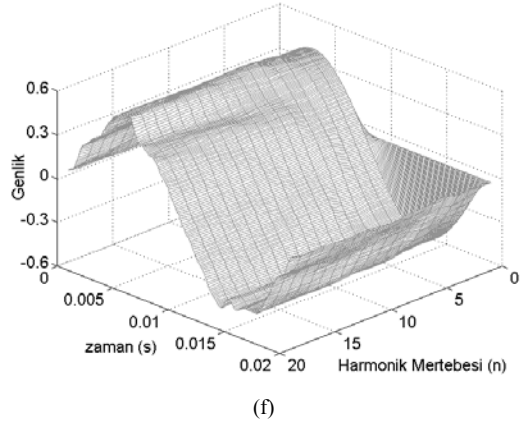
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 7. PWM kontrollü AC gerilim kontrolcüsünün harmonik analiz sonuçları, a) Harici veri ile tanımlanmış dalga şekli, b) Dalga şeklinin 2B harmonik analizi, c) Harmoniklerin zaman uzayındaki 2B gösterimi, d) Harmoniklerin zaman uzayındaki 3B gösterimi, e) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 2B gösterimi, f) Harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin 3B gösterimi.

Bu konu başlığı altında örnek olarak verilmiş üç dalga şekline ilişkin harmoniklerin, geliştirilen Matlab programı tarafından hesaplanmış rakamsal genlik değerleri Tablo

1’de topluca verilmiştir. Çok küçük genlik değerine sahip bazı harmonikler, aslında var olmayan, ancak FFT işlemleri sonucunda hesap edilen harmoniklerdir. İşlemlerin hassasiyeti, dalga şeklini tanımlayan veri sayısı artırılarak veya tolerans değeri azaltılarak (işlemlerde kullanılan ondalık hane sayısı yükseltilerek) artırılabilir.

Tablo 1. Örnek uygulamalara ait genlik sonuçları.

Harmonikler		Örnek Uygulamalara Ait Genlik Sonuçları		
n	f (Hz)	Kare Dalga	Triyak kontrollü Omik yük	PWM kontrollü AC dönüştürücü
0	0	0.0047	0.06092	0.0027
1	50	1.2729	183.12920	0.4991
2	100	0.0095	0.90810	0.004
3	150	0.4233	98.87850	0.0033
4	200	0.0095	0.33460	0.0237
5	250	0.2528	32.90080	0.0046
6	300	0.0095	0.21150	0.0228
7	350	0.1794	32.94300	0.003
8	400	0.0096	0.15590	0.0031
9	450	0.1382	19.77730	0.0086
10	500	0.0096	0.12370	0.0065
11	550	0.1118	19.79250	0.011
12	600	0.0097	0.10270	0.0033
13	650	0.0933	14.16230	0.0024
14	700	0.0097	0.08790	0.0057
15	750	0.0795	14.17000	0.0064
16	800	0.0098	0.07690	0.0012
17	850	0.0689	11.05130	0.0017
18	900	0.0099	0.06840	0.0107

V. SONUÇ

Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmonikler, şebeke ve yükler üzerinde bazı zararlı etkilere sahiptir. Bu zararlı etkilerin en aza indirilebilmesi için, öncelikle doğrusal olmayan yüklerin harmonik etkinlikleri hakkında yeterince bilgi sahibi olunmalıdır. Harmonik etkinlik, doğrusal olmayan bir yükün akım ve gerilim dalga şekli içindeki harmoniklerin frekansı ve genliği ile ilişkilidir. Harmoniklerin frekans ve genlikleri hakkındaki bilgi, harmonik analizi ile kolaylıkla elde edilebilir. Bu çalışmada, harmonik analizörü olarak kullanılacak bir yazılım paketi geliştirilmiştir. Yazılım paketi, mouse veya klavye ile tanımlanabilen dalga şekillerinin, parçalı fonksiyonları ile tanımlanabilen dalga şekillerinin, simülasyon paket programları veya bir programlama dili yardımıyla simüle edilmiş dalga şekillerinin veya bir sayısal osiloskop yardımıyla uygulama devresinden ölçüm yoluyla elde edilmiş dalga şekillerinin harmonik analizini gerçekleştirip, analiz sonuçlarını iki ve üç boyutlu ortamda görüntüleyebilmektedir. Bu yönleriyle paket program, hem eğitim amaçlı hem de profesyonel amaçlı kullanılacak bir yazılımdır. Harmoniklerin gerek zaman uzayındaki üç boyutlu gösterimleri ve gerekse harmoniklerin temel dalgaya olan toplam etkilerinin üç boyutlu gösterimi daha açıklayıcı/öğretici yeni bir yöntemdir. Kullanıcıya, analizi

yapılacak olan dalga şeklini tanımlaması için farklı yöntemler sunması, yazılım paketinin diğer bir üstünlüğüdür. Mevcut durumdaki diğer paket programlar ise, dalga şeklini tanımlamak için bu yöntemlerden bir veya bir kaçını kullanmaktadır. Örneğin OrCad® veya SimCad® paket programları, kendi simülasyon sonuçlarına göre harmonik analizi yapmaktadır; harici verilerin harmonik analizi için özel bir yöntem tanımlanmamıştır.

Yazılım paketi her ne kadar enerji sistemleri için hazırlanmış bir program olsa da, başka bilim dallarında da kullanılacak esnekliğe sahiptir. Geliştirilen program, Matlab çalışma sayfası ortamında kullanıcı etkileşimli olarak çalıştırılabilen .m uzantılı dosya olarak oluşturulmuştur. Programa, bir kullanıcı arayüzü (GUI) ilave edilerek daha fazla görsellik ve kullanım kolaylığı getirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Arrilaga, J., Bradley, D. A., and Bodger, P. S., *Power Systems Harmonics*, John Wiley and Sons, Inc., (1985).
- [2]. Rashid, M. H., *Power Electronics Handbook*. Academic Press, Inc., New York, 559-615, 820-829, 2002.
- [3]. Chicharo, J., Wang, H., *Power System Harmonic Signal Estimation and Retrieval for Active Power Filter Applications*, IEEE Trans. on Power, 9(6), 580-586, (1994).
- [4]. Ay, S., *Alçak Gerilim Tesislerinde Harmoniklerin İncelenmesi*, Kaynak Elektrik Dergisi, 129, İstanbul, (1999).
- [5]. Atmaca, E., *Harmoniklerin Elektrik Donanımı Üzerindeki Etkileri*, 3e Dergisi, 19, 311-318, (1995).
- [6]. IEEE Standard 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE, New York, (1993).
- [7]. Howard, A., *Data Acquisition Techniques Using Personal Computers*. Academic Press, Inc., 184-191, (1991).
- [8]. McGillem, C. D., Cooper, G. R., *Continuous and Discrete Signal and System Analysis*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., (1974).
- [9]. Cooley, J.W., Tukey, J.W., *An Algorithm for The Machine Computation of Complex Fourier Series*. Mathematical Computations, 19, 297-301, (1965).
- [10]. Biran, A., Breiner, M., *MATLAB for Engineers*. Addison-Wesley Publishing Company, (1995).
- [11]. Ingle, V.K., Proakis, J.G., *Digital Signal Processing Using Matlab*. Bookware Companion Series, 116-172, (2000).
- [12]. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., Blaabjerc, F., *Control in Power Electronics*, Academic-Press, Inc., (2002).

- [13]. Williams, B. W., *Power Electronics Devices, Drivers, Applications and Passive Components 2nd ed.*, McGraw-Hill, Inc., (1992).
- [14]. Bose, B. K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice-Hall, Inc.,(2002).
- [15]. Springob, L., *Power Electronics and Drive Technology*, Leybold Didactic GMBH, (1997).