

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GELEN VE YANSIYAN DALGALARIN
FREKANS ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE AYRIŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elif ERKEK

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak, 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GELEN VE YANSIYAN DALGALARIN
FREKAN ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE AYRIŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Elif ERKEK
517121001**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı

Ocak, 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 517121001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Elif ERKEK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **Gelen ve Yansıyan Dalgaların Frekans Analizi Yöntemleriyle Ayırıştırılması** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Abdüsselam Altunkaynak**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Tarkan Erdik
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç. Dr. Ali Osman Pektaş
Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği programının bünyesinde ve sayın Doç.Dr. Abdüsselam ALTUNKAYNAK danışmanlığında yapılmıştır ki bu vesileyle kendilerine verdikleri her türlü destek için teşekkürler ve saygılarımı sunuyorum.

Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlar ve desteklerini esirgemeyen sayın Yar.Doç.Dr. Tarkan ERDİK ve sayın Doç.Dr. Mehmet ÖZGER'e saygılar ve şükranlarımı sunup minnettarlığımı arz ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda hissettiğim aileme ise verdikleri maddi ve manevi desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Aralık 2014

Elif Erkek
Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Yansıma Analizi ve Literatür Araştırması.....	1
1.2 Tezin Amacı	3
2. DALGALAR VE DALGA SPEKTRUMU	5
2.1 Deniz Dalgalarının Tanımı	5
2.2 Dalga Spektrumu	11
3. FREKANS ANALİZİ VE KULLANILAN METODLAR	17
3.1 Periyodiklik, Periyot ve Frekans	17
3.2 Fourier Analizi	20
3.2.1 Fourier serileri	22
3.2.2 Ortogonal fonksiyonlar	24
3.2.3 Euler- fourier formülü	24
3.2.4 Fourier katsayıları	25
3.3 Walsh Analizi	26
3.3.1 Walsh fonksiyonlarının tanımı	27
3.3.2 Walsh ile fourier arasındaki ilişki	30
3.3.3 Walsh fonksiyonlarının sıralanması	31
3.3.3.1 Ardışık sıralama(sequence order)	31
3.3.3.2 Doğal sıralama (natural order)	32
3.3.4 Walsh fonksiyonlarının türetilmesi	32
3.4 Dalgacık Analizi.....	34
3.4.1 Dalgacık analizinin matematiksel temelleri	35
3.4.1.1 Sürekli dalgacık dönüşümü	36
3.4.1.2 Ayrık dalgacık dönüşümü	37
3.4.2 Dalgacık ile fourier arasındaki ilişki	41
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	43
4.1 Düzensiz Dalga Üretici Sistem.....	43
4.2 Dalga Sinyallerinin Pistona Gönderilmesi	45
4.3 Düzensiz Dalga Üretici Kanalda Dalga Yüksekliği Ölçümleri.....	46
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	49
5.1 Sonuçların Değerlendirilmesi.....	49
5.2 Metodların Sonuçları ve Yorumlar	49

6. BULGULAR	59
KAYNAKLAR.....	61
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	85

KISALTMALAR

ADD	: Ayrık Dalgacık Dönüşümü
P-M	: Pierson- Moskowitz Spektrumu
AD	: Ayrık Dalgacık Bileşeni

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları $Wal(n,m)$	28
Çizelge 4.1 : Düzensiz dalga üretici kanalda ölçülen dalga yüksekliği ve periyot....	47
Çizelge 5.1 : Dalga serileri için elde edilen R^2 değerleri.....	50
Çizelge 5.2 : Yansıma katsayılarına göre korelasyon analizi ile elde edilen belirlilik katsayı değerleri (düzenli dalga)	53
Çizelge 5.3 : Yansıma katsayılarına göre korelasyon analizi ile elde edilen belirlilik katsayı değerleri (düzensiz dalga).....	54
Çizelge 5.4 : Düzenli ve düzensiz dalgaların walsh fonksiyonu için hesaplanan katsayı değerleri (gelen dalga)	55
Çizelge 5.5 : Düzenli ve düzensiz dalgaların walsh fonksiyonu için hesaplanan katsayı değerleri (yansıyan dalga).....	56
Çizelge 5.6 : Düzenli ve düzensiz dalgaların ADD ile elde edilen bileşenleri (Gelen dalga).....	57
Çizelge 5.7 : Düzenli ve düzensiz dalgaların ADD ile elde edilen bileşenleri (Yansıyan dalga)	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Düzensiz dalga üretici kanal.....	4
Şekil 1.2 : Düzensiz dalga kanalı ve dalga problemlerinin yerleşimi.....	4
Şekil 2.1 : Sinüzoidal dalgada dalga karakteristikleri.	5
Şekil 2.2 : 3D olarak sinüzoidal dalganın en-kesit görünüşü.	7
Şekil 2.3 : Su seviyesi salınımının zamana bağlı değişimi.....	8
Şekil 2.4 : Farklı dalga boyu ve genliğe sahip bir çok sinüzoidal dalganın bileşenleri	8
Şekil 2.5 : Gerçek su yüzeyi profili.	9
Şekil 2.6 : Dalga enerji spektrumu yoğunluğuna bir örnek	10
Şekil 2.7 : Dalga spektrumuna ait tipik bir frekans serisi.....	13
Şekil 2.8 : Dalga spektrum yoğunluk fonksiyonları (P-M ve JONSWAP spektrumları).	15
Şekil 2.9 : Rüzgar ve soluğan dalgalarının birlikte olduğu dalga spektrumu (Kamphuis, 2000).....	16
Şekil 3.1 : Periyot ve periyodiklik şekilleri.	17
Şekil 3.2 : İki sinyalin birleşimi.....	18
Şekil 3.3 : Zaman-Frekans-Genlik Düzlemi.....	19
Şekil 3.4 : Bazı temel sinyallerin frekans spektrumları; a) sinüs dalgası. b) kare dalga. c) sönümlü dalga. d) dürtü.....	20
Şekil 3.5 : Bazı sinyallerin sinüzoidal bileşenleri.....	21
Şekil 3.6 : Ardışık sıralı düzenlenmiş Walsh fonksiyonlarının bir dizisi.....	28
Şekil 3.7 : Hadamard matrisi kullanılarak elde edilen doğal sıralama.	33
Şekil 3.8 : Hadamard- Walsh dönüşümünde ardışık dizi sıralaması.	33
Şekil 3.9 : N=16 için ardışık düzenlenmiş Walsh fonksiyonları.	34
Şekil 3.10 : Dalgacık Analizi.....	34
Şekil 3.11 : Haar dalgacığı.	36
Şekil 3.12 : Mallat tarafından önerilen ADD' nin genel çalışma prensibi.	39
Şekil 3.13 : İşaretin ADD ile bileşenlerine ayrılıp tekrar oluşturulması(S, orijinal işaret, Y, yaklaşık bileşen, AD, detay bileşen)	39
Şekil 3.14 : İşaretin Matlab aracılığıyla ADD ile bileşenlerine ayrılıp tekrar oluşturulması).....	40
Şekil 4.1 : Düzensiz dalga üretici kanal	43
Şekil 4.2 : Hidrolik piston	44
Şekil 4.3 : Hidrolik besleme sistemi	44
Şekil 4.4 : Düzensiz dalga düzenineğini yönlendiren sistem ...	45
Şekil 4.5 : Mafsallı tip piston aleti	46
Şekil 4.6 : Dalga ölçerlerin konumu (Düzensiz dalga üretici kanal) ...	46
Şekil 4.7 : Düzensiz dalga üretici kanalda ölçülen dalga yüksekliği ve periyodu ...	47
Şekil 4.8 : Dalga kanalı	48
Şekil 5.1 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli) ...	51

Şekil 5.2 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	51
Şekil 5.3 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	52
Şekil A.1 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)	65
Şekil A.2 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	65
Şekil A.3 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	66
Şekil A.4 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)	66
Şekil A.5 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	67
Şekil A.6 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	67
Şekil A.7 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)	68
Şekil A.8 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	68
Şekil A.9 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	69
Şekil A.10 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)	69
Şekil A.11 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	70
Şekil A.12 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	70
Şekil A.13 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)	71
Şekil A.14 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)	71
Şekil A.15 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)	72
Şekil A.16 : 1 nolu düzenli dalganın su yüzeyi profili ...	73
Şekil A.17 : 2 nolu düzenli dalganın su yüzeyi profili ...	74
Şekil A.18 : 3 nolu düzenli dalganın su yüzeyi profili ...	75
Şekil A.19 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri) ...	76
Şekil A.20 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri) ...	77
Şekil A.21 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri) ...	78
Şekil A.22 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri) ...	79
Şekil A.23 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri) ...	80
Şekil A.24 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri) ...	81

Şekil A.25 : 3 nolu düzensiz dalğanın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri)	82
Şekil A.26 : 3 nolu düzensiz dalğanın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri)	83
Şekil A.27 : 3 nolu düzensiz dalğanın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri)	84

GELEN VE YANSIYAN DALGALARIN FREKANS ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE AYRIŞTIRILMASI

ÖZET

Ülkemizde giderek yapımı artan deniz yapılarının inşa süresi için uzun bir zamana ihtiyaç duyulması, bu yapılara etki eden tasarım parametrelerinin belirlenmesi, yapım maliyetinin yüksek olması, ayrıca ülke ekonomisinde önemli bir fonksiyona sahip olmaları mühendislerin çeşitli araştırmalara yönelmesine sebep olmaktadır. Başlıca kıyı yapıları limanlar, dalgakıranlar, kıyı duvarları, mahmuzlar ve platformlar olarak verilebilir. Bu yapıların rüzgâr, akıntı, dalga ve deprem gibi doğal çevresel etkilere karşı fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri istenmektedir. Dalgalar deniz yapılarını etkileyen çevresel şartlar arasında en önemli olanıdır ve deniz yapılarının projelendirilmesinde önemli bir faktördür.

Laboratuvar deneyleri sayısal modelleme ve arazi gözlemleri ile birlikte çeşitli dalga problemleri için yararlı bir araç sağlamaktadır. Özellikle matematik veya sayısal yollarla çözülmesi çok karmaşık durumları araştırmak için laboratuvar deneyleri kullanılmaktadır. Deneysel sonuçlar, farklı dalga parametreleri açısından yorumlanır, çünkü kıyıların veya eğimli yapıların gelen dalga ve yansıyan dalganın incelendiği laboratuvar deneylerinde, en temel ve önemli adım, dalgaların özelliklerini belirlemektir.

Bir dalga üretici kanal içinde, gelen ve yansıyan dalgaları ayrıştırabilmek için çeşitli yöntemler vardır. Bugüne kadar kullanılan yöntemler içerisinde en kabul gören yöntem fourier analizidir. Ancak birçok frekans analizi ile gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılabileceği bu tez kapsamında ortaya konulacaktır. Fourier analizi ile elde edilen sonuçlar, Walsh analizi ve Dalgacık analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analizler belirlilik katsayısı R^2 , RMSE, CE VE SI ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Hem düzenli hem de düzensiz dalgalar için en iyi tahmin sonucu Wavelet analizi ile elde edilmiştir.

ESTIMATION OF INCIDENT AND REFLECTED WAVES USING FREQUENCY ANALYSIS METHODS

SUMMARY

Laboratory experiments provide a useful tool for various water wave problems along with numerical modeling and field observations. Principally laboratory experiments are used to investigate the phenomena that are too complex to be solved by mathematical or numerical means. In laboratory experiments involving wave reflection from sloping beaches or structures, one of the most fundamental and important task is to determine the characteristics of incident waves, because various experimental results are interpreted in terms of the incident wave parameters. It is well known that reflected waves become one of the important factors affecting the hydrodynamics and the sediment dynamics in front of the reflector. Therefore, a understanding of the nature of wave reflection by marine structures or their armored boundaries is required before their construction. Most of the marine or coastal structures are often constructed on a sloping bed or arbitrary bathymetry with complicated current field. Wave reflection consists of the interactions between waves, structures, currents and sloping beds.

The wave reflection of marine structures or their armored boundaries is usually tested to examine their performances by two- or three-dimensional physical models before such structures are constructed. In general the reflection coefficient of marine structures is one of important examination items. On the other hand, it is desirable to separate the wave train into the incident and reflected waves so that the reflection coefficient can be related to incident wave and structure properties in many studies. The marine structures in site are usually constructed on sloping natural beds.

There are several ways to determine the incident waves in a laboratory wave flume. The easiest way is to divide the test section of the flume into two along the flume.

The experimental beach or structure is installed in one of them, and the other is left empty, just having a wave absorber at the downwave side. The waves measured in the latter section are then considered as the incident waves. This method assumes that the re-reflection from the wave paddle of the waves reflected from the experimental beach or structure is small compared with the incident waves. To satisfy this assumption, the width of the empty section should be several times larger than that of the experimental section so that a relatively wide flume is required. Several methods were used to separate the wave train into the incident and reflected waves for two-dimensional waves propagating over a horizontal bed, and are presently used in the laboratory as well as field for a variety of applications (e.g. Goda and Suzuki, 1976; Mansard and Funke, 1980; Frigaard and Brorsen, 1995; Suh et al., 2001; Lin and Huang, 2004; and others). The above-mentioned methods provide the separation of incident and reflected waves but are unable to strictly account for waves traveling over a sloping beach.

Another way is to simultaneously measure the waves at several locations along the flume in front of the experimental beach or structure and separate the incident and reflected waves from the wave records (Goda and Suzuki, 1976; Gaillard et al., 1980; Mansard and Funke, 1980; Park et al., 1992). This method also assumes that the re-reflected wave energy from the wave paddle is small compared to the incident wave energy. Gravesen et al. (1974) and Kit et al. (1986) took into account the re-reflected waves from the wave paddle. Nowadays, however, most wave maker control system contains the so-called reflected wave absorbing filter that can suppress the re-reflection from the wave paddle. This is achieved by continuously sensing the reflected waves by a wave gauge attached at the front face of the paddle and correcting the input signal for the movement of the paddle. Therefore, the methods of Goda and Suzuki (1976), Gaillard et al. (1980), Mansard and Funke (1980) or Park et al. (1992) can be applied with little errors. On the other hand, several investigators (Guza et al., 1984; Tatavarti et al., 1988; Kubota et al., 1990; Walton, 1992; Hughes, 1993) have used wave gauge and current meter co-located on the same vertical line rather than spatially separated wave gauges. The co-located gauge method is useful in situations where there are spatial variations in the wavelength, such as on a mildly sloping bottom or in the region close to highly

reflective structures. Recently, Baldock and Simmonds (1999) presented a modification to the wave gauge array method to be used on an arbitrary bathymetry.

Wavelet transform is a relatively new technique for signal processing and can generate localized time-frequency information from time series, and the analytic signals of a real time signal at each frequency can be constructed via an analytic wavelet transform (Mallat, 1999). The Morlet wavelet (Goupillaud et al., 1984) is an analytic wavelet; thus the analytic signals of a real time signal at each frequency can be constructed via the Morlet wavelet transform. Over the past decade, the Morlet wavelet transform has been applied successfully to ocean and coastal engineering applications (Dong et al., 2008; Liu, 2000; Massel, 2001; Huang, 2004).

There are several methods for separating of incoming and reflected waves in a laboratory wave flume. Many frequency analysis methods can be used for separation of incoming and reflected waves will be presented in this study. The obtained results were compared with Fourier analysis, wavelet analysis and Walsh analysis. Analysis were evaluated according to coefficient R², RMSE, CE and SI. Best estimates results were obtained by wavelet analysis for both regular and irregular waves.

1.GİRİŞ

Kıyı bölgeleri dalga, akıntı ve fırtına gibi çevresel etkilerin altında kalırlar. Çevresel etkilerin kara ile yaptığı bu karmaşık etkileşim kıyı hidrolik sistemini oluşturmaktadır. Kıyı hidroliğinin temel konusu ise dalgalardır. Dalgalar ise rüzgar enerjisinin su yüzeyine geçmesiyle su yüzeyinde meydana gelen salınımlar olarak kısaca tariflenebilir. Oluşan bu dalgalara rüzgar dalgaları adı verilir. Dalgalar oluşum nedenlerine göre, rüzgar dalgası, ölü deniz dalgası, surf salınımı, seiche, çalkantı, tsunami, gel-git ve fırtına kabarması olarak sınıflandırılmaktadırlar. Ancak kıyı yapılarının tasarımı, planlanması vb. aşamalarda rüzgar dalgalarının mekaniği kıyı ve liman mühendisliğinin hidroliği açısından çok büyük önem arz etmektedir. Kıyı yapıları, gelen dalga enerjisinin bir kısmını yansıtırlar. Dalga yansıması, gelen dalgalar ile yansıyan dalgalar arasındaki etkileşimden dolayı denizde oluşturdukları düzensizlik nedeniyle bir takım problemlere (liman girişinde seyir zorlukları, liman içinde çalkantı artması gibi) neden olurlar. Yansıyarak büyüyen dalgalar koruyucu yapıların topuklarında deniz tabanında erozyona neden olur. Ayrıca, kıyı yapılarından yansıyan dalgalar yakın kıyılarda da erozyon oluşturabilirler. Bu sebeplerden dolayı yansıyan dalgaların belirlenmesinde kullanılan yansıma katsayısını elde etmek için birtakım frekans analizi yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmada frekans analiz yöntemleri kullanılarak gelen ve yansıyan dalgalar modellenerek analiz edilmiştir.

1.1 Yansıma Analizleri ve Literatür Araştırması

Kıyı mühendisliği çalışma ve uygulamasında dalga düzensizliği kavramının önemi artık haklı olarak birçok araştırmacı ve mühendisler tarafından kabul edilmektedir. Dünyada hidrolik laboratuvarlarında düzensiz dalga jeneratörleri sayısındaki hızlı artış bunun bir göstergesidir. Düzensiz dalgalarda yansıyan dalgaların belirlenmesi kıyı yapılarının modellenmesinde önemlidir. Çünkü gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması mümkün hale gelirse, o zaman bir dalga paleti ile bir yansıtıcı yapı

arasındaki düzensiz dalgalar yansıma endişesi olmadan sürekli çalışır ve yansıtıcı kıyı yapılarının testlerinde kesin sonuçlar elde edilebilir.

Deniz ve kıyı mühendisliğinde, deniz yapılarının ya da kıyıların yansıma katsayılarının anlaşılabilmesi için gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması gereklidir. Bunun için literatürde az sayıda kullanılan yöntemler mevcuttur. Bunlar, frekans bazında (Goda and Suzuki, 1976; Mansand and Funk, 1980; Suh et al., 2001) ve zaman bazında (Frigaard and Brorsen, 1995; Sun et al., 2002) analizler olarak adlandırılmıştır. Bunun yanında, dalgaları ayrıştırmak için batimetrelerden de yararlanılmıştır (Baldock and Simmonds, 1999; Chang and Hsu, 2003). Kullanılan ayırma yöntemleri çoğunlukla Fourier dönüşümüne bağlı olarak yapılmış olup, bu teknik durağan olmayan dalgalar için uygun görülmemektedir.

Dalgacık dönüşümü sinyal işleme için zaman serilerinden zaman-frekans bilgisi elde edebilmek için kullanılan yeni bir tekniktir ve analitik sinyallerinin gerçek zamanlı sinyali, her frekansta bir analitik dalgacık dönüşümü ile inşa edilebilir (Mallat, 1999). Son on yıl içinde, dalgacık dönüşümü başarıyla deniz ve kıyı mühendisliği uygulamalarında (Dong et al., 2008; Liu, 2000; Massel, 2001; Huang, 2004) kullanılmıştır.

Düzensiz dalgaların yanı sıra, kıyı ve deniz mühendisliği çalışmalarında düzenli dalgalar için de yansıma analizleri büyük bir ihtiyaç oluşturmaktadır. İki boyutlu düzenli dalgalar altında dalgakıran, kıyı yapısı veya plaj ile ilgi olan dalga kanalı testlerinde bu durum ortaya çıkabilir. Dalga yansıma katsayısı, dalga kanalına yerleştirilen bir prob yardımıyla ölçülen minimum ve maksimum dalga yüksekliklerine bağlı olarak hesaplanabilir. Gelen dalga yüksekliği (H) ve yansıma katsayısı (K);

$$H = \frac{H_{max} + H_{min}}{2} \quad (1.1)$$

$$K = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (1.2)$$

olarak hesaplanır. Ancak problemler yardımı ile ölçülen dalga, gelen dalgaya mı yoksa yansıyan dalgaya mı ait olduğunu belirleyebilmek için frekans analizleri yapılması gerekmektedir. Önceki çalışmalarda dalga yansımasını belirleyebilmek için sabit dalga problemleri kullanılarak ölçüm (Thornton and Calhoun (1972); Goda and

Suzuki (1976); Mansard and Funke (1980)) yapılmıştır, bu çalışmalar genellikle düzenli dalgalarla yapılmış olup düzensiz dalgalar için de çalışmalar mevcuttur.

Fourier analizinin yanısıra wavelet analizi ile yapılan ender çalışmaların dışında Walsh analizi gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması için kullanılmamıştır. Bu tez kapsamında ilk defa denenecek olup, tüm analiz yöntemlerinin sonuçları birbirleri ile karşılaştırılacaktır. Literatürde yapılan çalışmaların birçoğu Fourier analizi kullanılarak gelen ve yansıyan dalgalar modellenmiştir. Ancak bu çalışmada Fourier, Walsh ve Wavelet ayrıştırma yöntemleri kullanılarak gelen ve yansıyan dalgalar modellenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

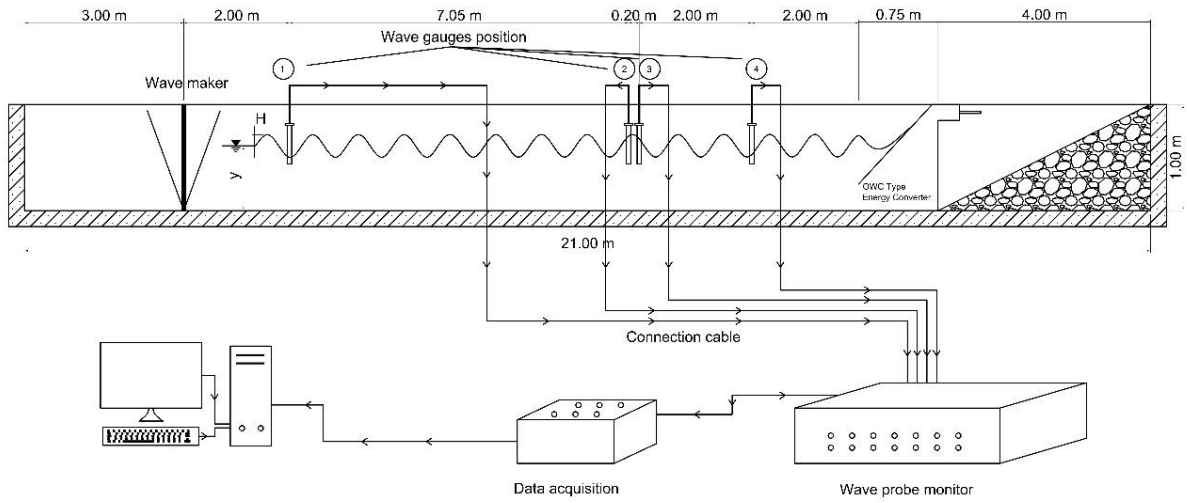
Fourier, Walsh ve Wavelet yaklaşımları kullanılarak bu tez çalışması gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada frekans analizi için fourier, walsh ve wavelet modelleri, gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılmasında kullanılacaktır.

Bu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında bulunan düzensiz dalga üretici kanaldan (Şekil 1.1) elde edilen 3 düzenli ve 3 düzensiz dalga serisi kullanılarak modellenmiştir. Düzensiz dalga üretici kanal, rüzgâr dalgalarının gerçek doğa şartlarına çok yakın bir biçimde modellenmesini sağlamaktadır. Bilgisayar vasıtasıyla kontrol edilen bu kanalda çeşitli spektrumlarla tanımlanan dalga serileri, farklı boyut ve periyotlara sahip olan dalgaların üretimini mümkün kılmıştır. Düzensiz dalga üretici kanal hem düzenli hem de düzensiz dalga üretmektedir. Bu kanalın genişlik, boy ve yüksekliği sırasıyla 1x22x1 metredir. Dalga yayılımını izlemek için kanalın duvarları camdan yapılmıştır. Dalga kanalından elde edilen veriler için gerekli dalga problemlerinin yerleşimi Şekil 1.2’de gösterilmektedir. Bu tezin spesifik amaçları ise:

- 1- Fourier, Walsh ve Wavelet yöntemleri kullanılarak gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması.
- 2- Fourier, Walsh ve Wavelet yöntemleri kullanarak dalga serilerinin modellenerek elde edilmesi.
- 3- Her üç yöntemin karşılaştırılması.



Şekil 1.1 : Düzensiz dalga üretici kanal



Şekil 1.2 : Düzensiz dalga kanalı ve dalga problelerinin yerleşimi

Genlik (a): Dalga yüksekliğinin yarısıdır.

Dalga dikliği (H/L): Dalga yüksekliğinin dalga uzunluğuna oranıdır.

Şekil 2.1’de gösterilen dalga karakteristik özellikleri en basit haliyle düzenli dalga olarak da tanımlanmaktadır.

Dalgalara ait diğer önemli bir parametre ise periyot T veya frekans f’dir. Aynı enkesitten ardışık iki tepe veya çukurun geçmesi için gereken zaman aralığı (saniye cinsinden) periyot olarak tanımlanmaktadır. Basitçe $f = 1/T$, yani frekans biliniyorsa periyot biliniyordur. Derin denizde dalga boyu, frekans ve periyot arasında şöyle bir ilişki söz konusudur ($T \propto L$) ve ($f \propto 1/L$)’dir. Genellikle dalga frekansının çok daha kolay ölçülebilir olması nedeniyle dalga boyu yerine dalganın frekansı dikkate alınmaktadır.

Dalga karakteristiklerinin açıklanmasına bağlı olarak bir deniz dalgası sakin su seviyesinin sinüzoidal bir formda yayılması olarak düşünülmektedir. ω frekansına sahip tek bir sinüzoidal dalga için dalga profili aşağıdaki gibi verilebilir. Şekil 2.2’de ise sinüzoidal dalga tipi üç boyutlu olarak gösterilmektedir.

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \delta) = a \cos(kx - \omega t + \delta) \quad (2.1)$$

Burada

H = dalga yüksekliği

a = genlik, $a = H/2$

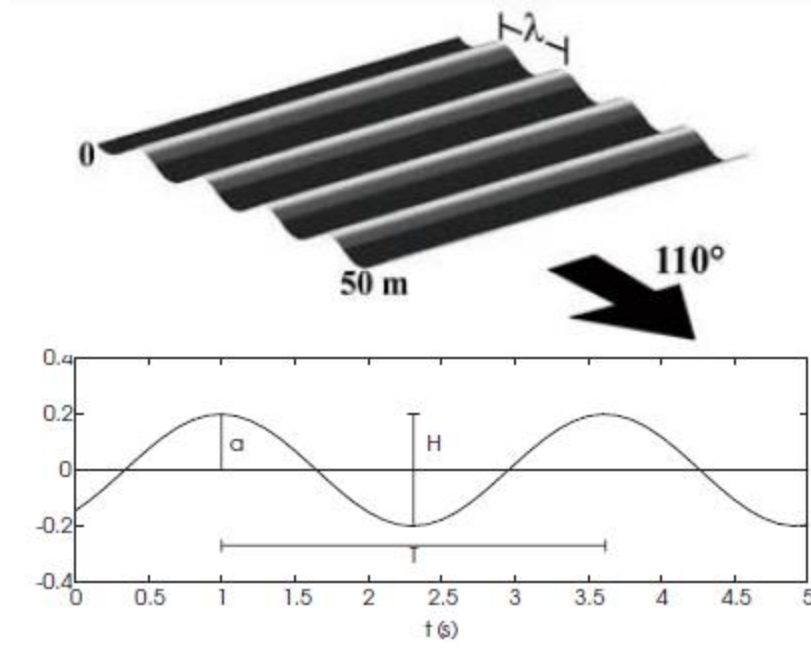
ω = açısal frekans = $2\pi / T$

T = dalga periyodu

k = dalga numarası, $k = 2\pi / L$

L = dalga boyu

δ = başlangıç fazı



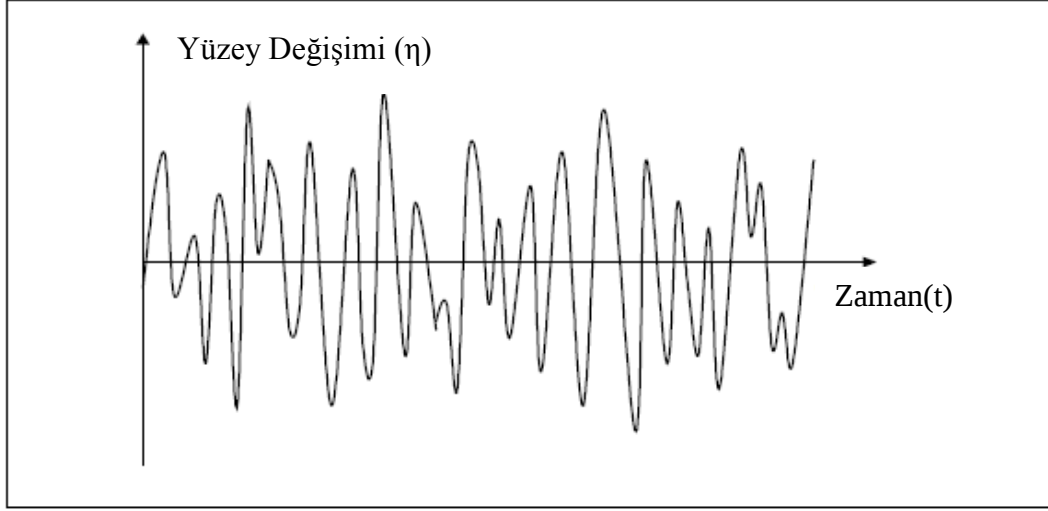
Şekil 2.2 : 3D olarak sinüzoidal dalganın en-kesit görünüşü

Dalga yüksekliği, dalga boyu ve su derinliği ile mukayese edildiğine oldukça küçükse, matematiksel olarak bu tip dalgalar lineer dalga olarak isimlendirilmektedir. Lineer dalga teorisinin en önemli avantajı, süperpoze edilebilme imkanını sağlamasıdır. Ancak lineer dalga teorisi sadece küçük genlikli dalgalar için geçerli olmakta ve bu dalgalar da sinüzoidal forma sahiptirler. Dalgalar gerçek denizde yaklaşık olarak bu şekilde görülebilmektedir, özellikle soluğan dalgalarında, ancak genelde su yüzeyi çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir.

Tekil dalgalar bir çok istatistiksel analiz gereği bazı ampirik yöntemler ve dalga teorileri ile hesaplanmaktadır. Örneğin, sıfırı yukarı/aşağı kesme yönteminde olduğu gibi karakteristik dalga parametreleri elde edilebilmektedir. Örneğin, eğer deniz yüzeyinin değişimi belirlenebilirse, belli bir zaman aralığında dalga tepesi ve çukuru hesaplanabilir. İki ard arda sıfırı yukarı kesme noktaları arasındaki mesafe eğer yatay eksen zamansa dalga periyodunu tanımlar, eğer yatay eksen mesafe ise dalga uzunluğunu tanımlamaktadır. Ard arda sıfırı yukarı kesme noktaları arasındaki en yüksek ve en düşük noktalar arasındaki düşey mesafe dalga yüksekliğidir. Sıfırı aşağı kesme yönteminde ise, yüzey profilinin sıfır hattını aşağı doğru kestiği noktalar tekil dalganın başlangıç ve bitiş noktaları olarak alınır (Çevik, 2006).

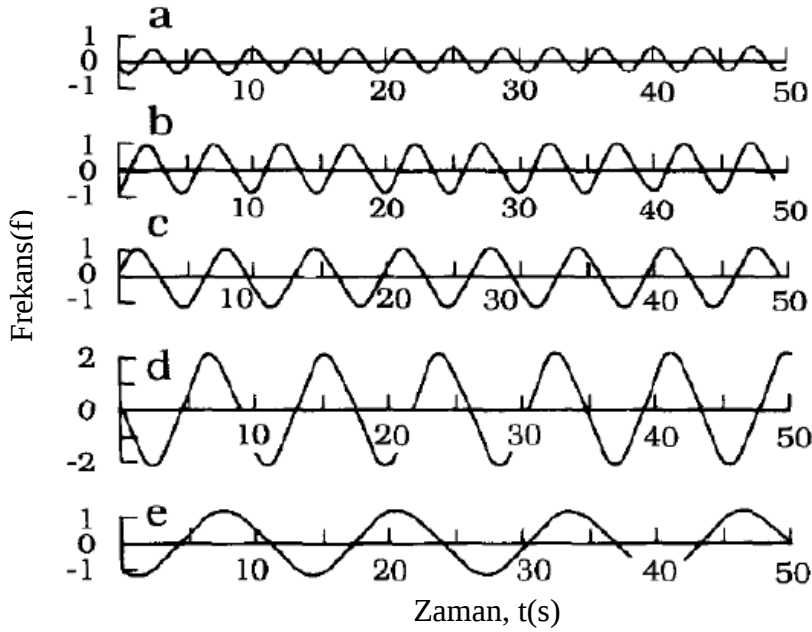
Şekil 2.3 bir şamandıradan elde edilen dalga verilerini göstermektedir. Su yüzeyi değişimini ölçen bu aletten elde edilen dalga kaydı kullanılarak, istatistiksel

yöntemle belirgin dalga yüksekliği (H_s) ve sıfırı yukarı kesme periyodu (T) belirlenebilmektedir.

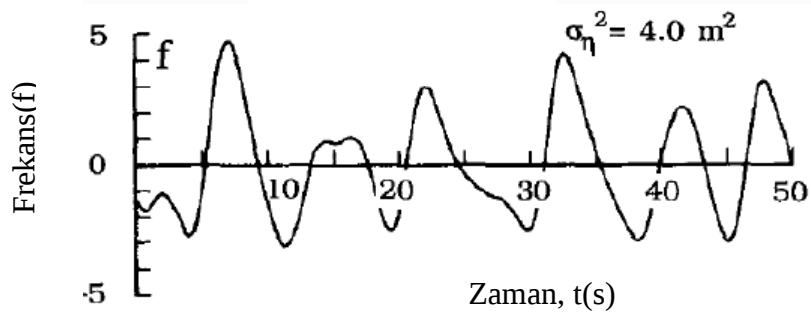


Şekil 2.3 : Su seviyesi salınımının zamana bağlı değişimi

Gerçek bir deniz durumu Şekil 2.4’de görüldüğü gibi farklı periyoda (T) ve genliğe (a) sahip bir çok sinüzoidal dalganın süperpoze edilmesi ile oluşmaktadır (Şekil 2.5). Bunun tam tersi olarak düzensiz bir deniz durumu bu düzenli bileşenlerine de ayrılabilir.



Şekil 2.4 : Farklı dalga boyu ve genliğe sahip bir çok sinüzoidal dalganın bileşenleri



Şekil 2.5 : Gerçek su yüzeyi profili

Bunlara ilave olarak farklı frekansa ve genliğe sahip bileşen dalgalar farklı yönlerde doğru ilerlemektedir. Bu düzenli dalgaların süperpoze edilebilmesiyle, daha büyük genliğe sahip daha uzun periyotlu bileşenlerin yönü etkin bir yön olarak ortaya çıkmaktadır. Genel olarak tekil dalgalar sıfırı yukarı/aşağı kesme yöntemlerinden biriyle belirlenebilir. Dalga yüksekliği ve dalga periyotlarının olasılık dağılımları ile deniz yüzeyinin düzensizliği düzensiz deniz dalgalarının zaman alanındaki analiziyle ifade edilebilmektedir. Deniz durumunun tanımlanması ve yapıların tasarımı için yapı tipine ve tasarıma bağlı olarak farklı karakteristik dalga parametreleri ($H_{1/3}$, $T_{1/3}$, H_{maks} , H_{rms}) kullanılmaktadır (Çevik, 2006).

Açık denizdeki düzensiz dalgaların bir çok tekil dalganın birleşiminden oluştuğu kabul edilebilir. Bu ifadeye göre bir noktada deniz yüzeyinin zamanla değişimi lineer dalgaların süperpoze edilebilme özelliğinden dolayı aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

$$\eta(t) = \sum_{j=1}^N a_j \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (2.2)$$

a_j = tekil dalga genliği

ω_j = tekil dalga açısal frekansı

ϕ_j = tekil dalga faz açısı

t = zaman değişkeni

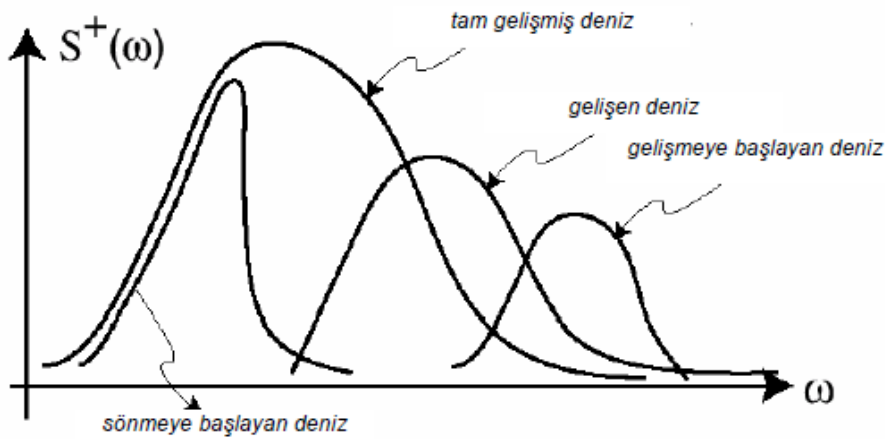
N = gözlenen tekil dalga sayısı

Düzensiz dalgaların istatistiksel teorilerinde, sıfırı yukarı kesme yöntemine göre ortalama dalga periyodu frekans spektrumunun sıfırcı moment ve ikinci moment kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$T_z = T_{m02} \sqrt{m_0/m_2} \quad (2.3)$$

Düzensiz dalgaların bir başka analiz yöntemi ise frekans alanındaki farklı frekanslara ve genliklere sahip çok sayıdaki sinüzoidal dalganın süperpozisyonu ile ifade edilebilmektedir. Deniz yüzeyinin durumu dalga spektrumu analizi yöntemiyle dalgaların bu bileşenlerine ayrılması ile de frekans alanında belirlenmektedir. Dalga spektrum analizinden elde edilen farklı mertebelerdeki spektral momentler yardımıyla düzensiz dalgaların istatistiksel teorilerinde elde edilen çeşitli dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametreleri elde edilebilmektedir. Düzensiz deniz dalgalarının dalga enerji spektrumu yöntemiyle analizi durumunda elde edilebilen bir başka parametre ise pik periyottur (T_p) ve pik frekanstır (f_p) (Şekil 2.6). Dalga enerji spektrumunun maksimum enerjisine karşılık gelen periyottur, $S(T_p) = \max S(T)$, bu ifade de pik periyot pik frekansın tersi olarak da aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir, (Tautenhain, 1981).

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (2.4)$$



Şekil 2.6 : Dalga enerji spektrumu yoğunluğuna bir örnek

Sıfırı yukarı/aşağı kesme yöntemlerinden elde edilen dalga yüksekliği ve dalga periyodu parametreleri bir dalga enerji spektrumundan teorik olarak elde edilemez. Ancak bu parametreler arasında çeşitli ilişkiler elde edilmiştir. Dalga yüksekliği ve dalga periyodu arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için saha verileri veya çeşitli sayısal simülasyonlar kullanılmaktadır. Günümüzde en çok uygulanan yöntem, soluğan dalga etkilerinin sayısal modellemesi ile dalga tahmin kombinasyonlarını içeren, deniz durumuna ait spektrum değeri ve karakteristik spektrum parametrelerinin kullanıldığı yöntemler olarak verilebilir (Tautenhain, 1981).

Çeşitli deniz yapılarının tasarımında problemin özelliğine göre her iki yöntem de kullanılmaktadır. Non-lineer yöntemlerde (yapıya etkiyen dalga yükü, dalga kırılması, dalga tırmanması gibi) zaman alanında simülasyon yöntemleri kullanılabilir. Ayrıca, lineer yöntemlerde (dalga sapması, dalga dönmesi gibi) frekans alanında süperpozisyon ilkesi öncelikli kullanılabilir. Frekans alanında ise her bir dalga bileşeni bağımsız karaktere sahiptir. Lineer dalga teorisi ve ampirik ifadeler ile tanımlanan her bir dalga bileşeni bağımsız olmasına rağmen sonuç olarak spektrum kavramı ile hesaplanabilmektedir.

Yukarıda belirtilen dalga profili, düzenli dalga, düzensiz dalga kavramları ile bunları ifade edebilmek için kullanılan çeşitli ampirik yöntemler ve dalga teorileri anlatılmaktadır. Dalga enerji spektrumu kavramı nedir ve nerede kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak spektrum analizi yöntemi anlatılmalıdır.

2.2 Dalga Spektrumu

Sabit bir deniz durumu için denize ait özellikler kısa dönem dalga istatistiği ile verilmektedir. Kısa dönem dalga istatistiği tekil dalgaların özellikleri ile ilgilenmektedir yani dalga yüksekliği, periyodu ve bunun gibi parametrelerin olasılık dağılımlarını vermektedir (Çevik, 2006). Dalgaların tamamen farklı tipteki bir analizi dalga frekansına dayanan bu dalga spektrum analizidir.

Dalga spektrumu rastgele dalgalar için en önemli kavramlardan biridir. Dalga spektrumu dikkate alınan konumda deniz durumunu tanımlayarak çeşitli dalga parametreleri hakkında bilgi verir. Önemli olan herhangi bir bölgede ölçülen dalgalarla ilgili tüm bilgileri veren yani deniz durumunu temsil eden uygun bir dalga spektrum modelinin seçilmesidir. En uygun spektrum, seçilen konumda ölçülmüş dalga spektrum modelidir. Düzensiz dalgaların spektrum analizi yapı tasarımı

açısından son derecede önemlidir. Örneğin dalga kuvvetinin önemli olduğu petrol arama platformlarının tasarımında rezonans meydana gelmemesi için yapının doğal frekansının dalga enerjisinin yoğunlaştığı frekans aralığından farklı olmalıdır.

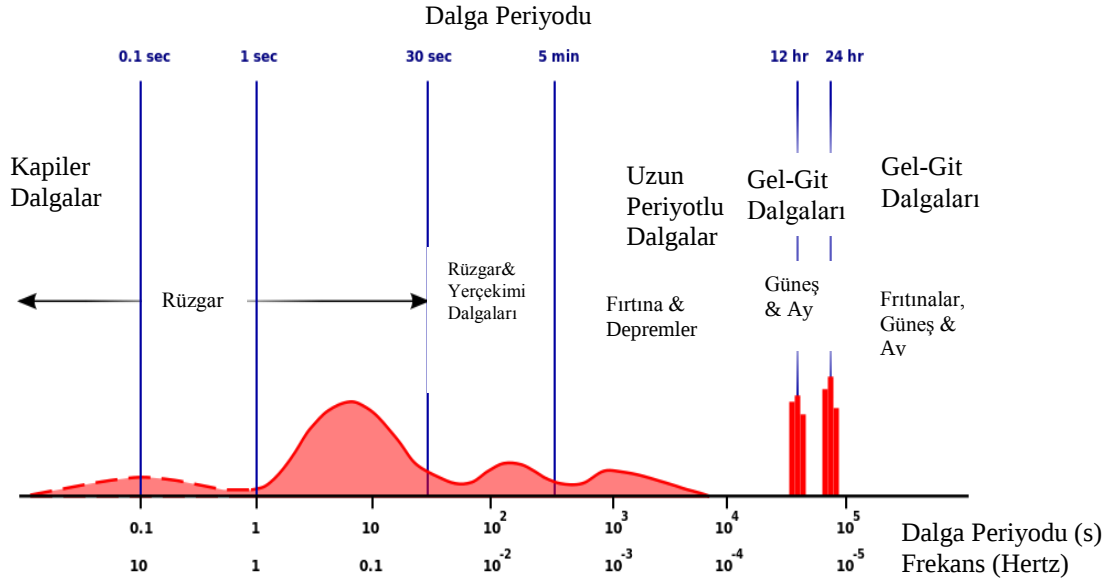
Açık denizdeki düzensiz dalgaların bir çok tekil dalganın birleşiminden oluştuğu kabul edilebilir. O halde bu düzensiz dalgaları oluşturan her bir basit dalganın enerjileri hesaplanır ve yön gözetilmeksizin frekansla değişimi çizilirse buna dalga spektrumu, frekans spektrumu, enerji spektrumu veya dalga enerji spektrumu adı verilmektedir. Dalga spektrumu $S(f)$ ile gösterilmektedir.

Buna karşılık eğer yönler dikkate alınarak aynı değişim çizilirse bu da yönlü dalga spektrumunu verir. Yönlü dalga spektrumu dalga enerjisi dağılımını sadece frekans ile değil yön ile (açı, θ) birlikte tanımlamaktadır. O halde hem frekans hem de yön kullanılarak ifade edilen enerji dağılımı yönlü dalga spektrumu olarak adlandırılmaktadır. Yönlü dalga spektrumu

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta, f) \quad (2.5)$$

ile ifade edilmektedir. Burada $S(f, \theta)$ yönlü dalga spektrumu yoğunluk fonksiyonu, $G(\theta, f)$ yönlü dağılım fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır.

Dalga spektrumu frekans ve yöne bağlı olarak dalga enerjisi dağılımını matematiksel olarak ifade etmektedir. Dalga spektrumu bir seri frekansı içermektedir. Çünkü deniz dalgalarının her biri farklı frekansa sahip sinüs dalgalarından oluştuğu kabul edilmektedir. Rüzgar ve soluğan dalgalarının farklı frekans alanında yoğunlaşması gibi bu frekanslar, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, küçük enerjili frekanstan büyük enerjili frekansa doğru, soldan sağa doğru bir dizi halinde artmaktadır. Belirli bir dizideki frekans değerleri, Şekil 2.7’deki gibi sonsuz sayıdaki sinüs dalgasını temsil etmektedir. Her bir sinüs dalgası belli miktarda enerjiye sahiptir ve sinüs dalgalarının enerjileri eklenik olarak toplandığında okyanus dalgalarına ait toplam enerjiye karşılık gelmektedir. Ancak bu toplam enerji, frekans serisi boyunca eşit olarak dağılım göstermemektedir; bunun yerine, her bir spektrum, belli bir rüzgâr hızına uyarak belirli bir frekans maks f etrafında yoğunlaşmaktadır. Şekil 2.7’den görüldüğü gibi dalga spektrumu üzerinde farklı rüzgar hızlarına bağlı olarak dalga enerjisinin farklı frekans aralıklarında yoğunlaştığı görülebilmektedir. Frekansın dar olduğu alanda çok dalga var iken, frekansın geniş bir alanda değişim göstermesi durumunda az dalga vardır.



Şekil 2.7 : Dalga spektrumuna ait tipik bir frekans serisi

Daha öncede belirtildiği gibi farklı yükseklik ve periyotlardaki düzenli dalgaların toplanmasıyla düzensiz dalga elde edilmektedir. Lineer bir dalganın yüzey profilinin varyansı aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_n^2 = Var[\eta(t)] = [\eta(t) - \bar{\eta}(t)]^2 = E[\eta(t)^2] = \frac{1}{T} \int_0^T \eta^2(t) dt = \frac{1}{2} a^2 \quad (2.6)$$

O halde frekansa karşılık yüzey profilinin varyansı, varyans histogramını vermektedir. Bununla birlikte dalganın birim alandaki enerjisi ise aşağıdaki ifade ile verilmektedir (Çevik, 2006).

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (2.7)$$

O halde yüzey profilinin varyansının ρg ile çarpılması ile dalga enerjisi elde edilmektedir.

Her bir tekil dalgayı dikkate alarak dalga dalga incelemek yerine, spektrum analizi sinyallerin frekansa karşılık varyans dağılımını vermektedir. Varyansın frekansa karşılık dağılımı $E(f)$ veya $S(f)$ ile gösterilmekte ve fonksiyonun frekans alanında

sürekli olduğu kabul edilmektedir. Deniz dalgaları durumunda enerji dağılımı sürekli bir eğridir çünkü düzensiz deniz dalgaları farklı frekanslara sahip sonsuz sayıda lineer bileşenden oluşmaktadır.

Spektrum yoğunluk fonksiyonu (enerji yoğunluk fonksiyonu) ise

$$S(f) = \frac{1/2a^2}{\Delta f} \quad (2.8)$$

ile verilmektedir.

Burada Δf frekans bant genişliğidir. Böylece sürekli bir fonksiyon olan dalga enerji yoğunluk fonksiyonu elde edilmektedir. Bu sürekli fonksiyona ‘frekans spektrum yoğunluk fonksiyonu’ veya ‘dalga enerji spektrumu’ denilmektedir ve boyutu (L^2T) ve birimi ise (m^2s)’dir. Aslında enerji spektrumu $E(f) = \rho g S(f)$ ile verilmekte ve $S(f)$ dalga varyans spektrumu olarak adlandırılmaktadır ve varyansın bir ölçüsüdür. Enerji yoğunluk spektrumunun altındaki alan fırtınadaki toplam dalga enerjisinin bir ölçüsüdür.

En popüler spektrum ifadesi tanımı ordinatta enerji yoğunluğunun kullanılması ve absiste frekans veya açısal frekansın kullanılmasıdır. Bu tarzdaki bir ifadenin avantajı eğrinin altındaki alanın dalga spektrumunun toplam enerjisini vermesidir (Çevik, 2006).

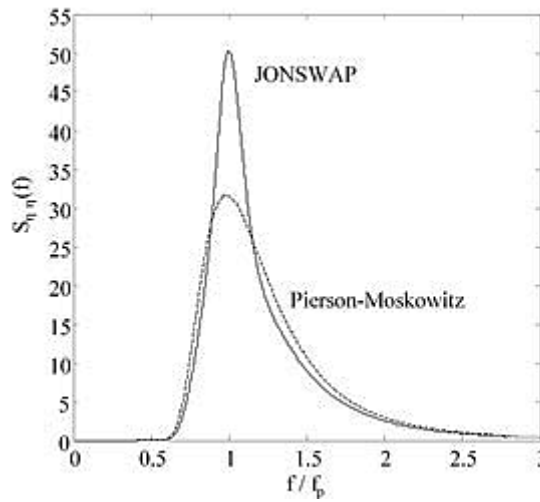
Bunlara ilave olarak, farklı bir analiz yöntemi olan Fast Fourier Transformasyon (FFT) tekniği yardımıyla spektrum analizi de kullanılabilir. Periyotları ve yükseklikleri farklı sonsuz sayıdaki düzenli dalganın toplanmasıyla düzensiz dalga elde edilmektedir. Bu düzensiz dalganın bileşenleri harmoniklerdir ve FFT serisi yardımıyla bu harmoniklerin değerleri elde edilmektedir. Fast Fourier Transformasyon (FFT) analizinin temel fikri herhangi bir periyodik fonksiyonun sonsuz sayıdaki harmonik bileşenlerden oluştuğu ve bileşenlerine ayrılabilceğidir. Buna göre verilen bir periyodik fonksiyon trigonometrik bir seriye açılarak temsil edilebilir.

f ’den $f+df$ ’e kadar değişen bir aralıkta dalga genliklerinin karelerinin toplamı sonlu ve tekdir. Bunların toplam değeri $S(f)$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi verilir;

$$\sum_f^{f+df} \frac{1}{2} a_n^2 = S(f) df \quad (2.9)$$

FFT analizi zamana bağılı olarak dalga yüksekliklerini grafik olarak yorumlayan, ayrıca dalga spektrumu olarak da bilinen, frekansa bağılı dalga enerji spektrum yoğunluğunu vermektedir. Bu şekil, ölçüm süresi boyunca denizdeki dalga enerjisinin hangi frekanslarda yayıldığını göstermektedir.

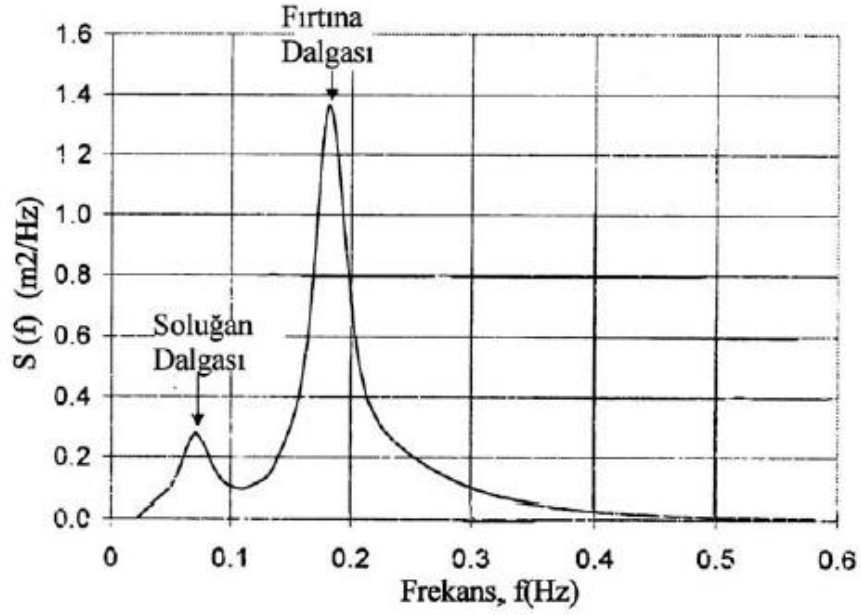
Bir dalga enerji spektrum şekli herhangi bir konumdaki dalga ölçümleriyle toplanan verilerle elde edilmektedir, ancak bu değerler birçok konumdaki dalga spektrumuna benzer olabilir. Şekil 2.8’de gösterilen grafikteki gibi, dalga spektrum şekli spektrum yoğunluk fonksiyonları ile genelleştirilebilir.



Şekil 2.8 : Dalga spektrum yoğunluk fonksiyonları (P-M ve JONSWAP spektrumları)

Dalga spektrumunun şekli dalga tipiyle değişiklik göstermektedir. Rüzgâr dalgalarına ait bir dalga spektrumu geniş bir bantta değişmektedir, oysa soluğan dalgalarına ait spektrum dardır. Soluğan dalgaları küçük frekanslı ve nispeten kararlı olduklarından dalga spektrumunda dar bir frekans alanında değişim göstermekte, buna karşın rüzgâr dalgaları ise daha düzensiz olduklarından geniş bir frekans alanında değişim göstermektedirler. Bir çok gerçek dalga spektrumu hem rüzgâr hem de soluğan bileşenini içermektedir. İki farklı deniz durumunun aynı anda olması durumunda

spektrumdan bu her ikisini ayırt etmek mümkündür. Şekil 2.9 rüzgar dalgası ve soluğan dalgasının aynı anda olması durumunu gösteren dalga spektrumuna ait bir örnektir (Çevik, 2006).

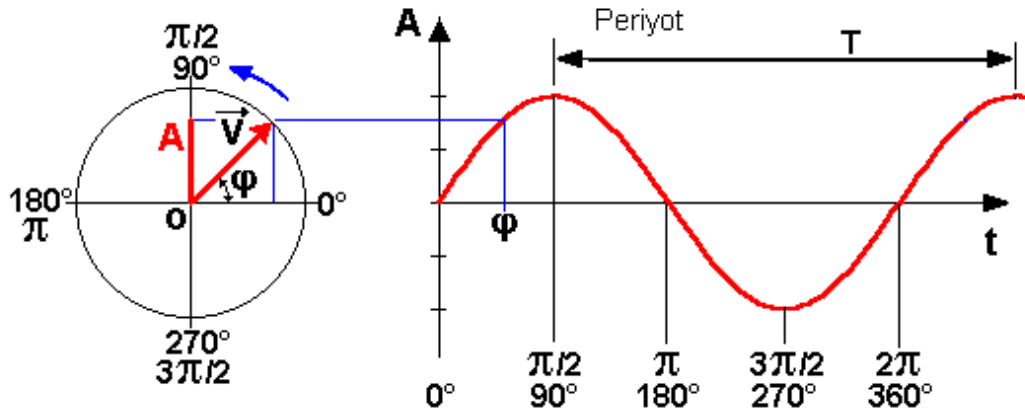


Şekil 2.9 : Rüzgar ve soluğan dalgalarının birlikte olduğu dalga spektrumu
(Kamphuis, 2000)

3. FREKANS ANALİZİ VE KULLANILAN METODLAR

3.1 Periyodiklik, Periyot ve Frekans

Belli zaman aralıklarında tekrar eden sürece periyodiklik, bu tür fonksiyonlara periyodik fonksiyonlar denir. Sinüs ve kosinüs gibi trigonometrik fonksiyonlar birer periyodik fonksiyonlardır. Örneğin sinüs fonksiyonu kendini 2π de bir tekrar eder. Bu tekrarlama süresine periyot (T) adı verilir. Başka bir tanım ise bir tam çevrim için geçen süredir ve birimi saniyedir (Şekil 3.1). Bir saniyedeki tam çevrim sayısına yani periyot sayısına ise frekans (f) denir. Frekansa, kullanılma yerine göre değişik adlar verilmektedir, örneğin fizikçiler ve elektronikçiler salınım hızı derken, bilgisayarlılar hız diye adlandırmaktadır. Genelde periyot bilgisi bilinmez ve üzerinde durulmazken, frekans değeri bilinir ve üzerinde değerlendirmeler yapılır. Çünkü çoğu bilim adamı (hekimler, mühendisler vb.) bir dizinin veya fonksiyonun içinde birden fazla görülen periyodik bileşenleri öğrenmek ister.

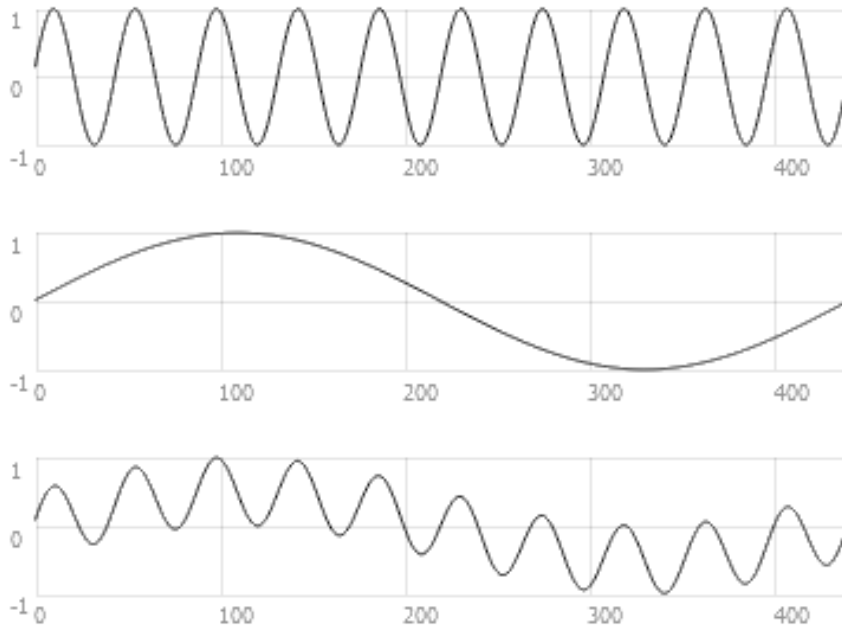


Şekil 3.1 : Periyot ve periyodiklik şekilleri

Zaman dizisine bakarak, değerlendirmeler yapmak çok zordur ve birçok bilgi görülemez, bir zaman dizisini frekans dizisine dönüştürerek değerlendirmeler yapılır. Çünkü frekans dizisinin içerdiği sinyaller veya başka bir deyişle gözlenen doğa olayının davranışı ve bu davranışa neden olan fiziksel kuvvetler hakkında daha kolay

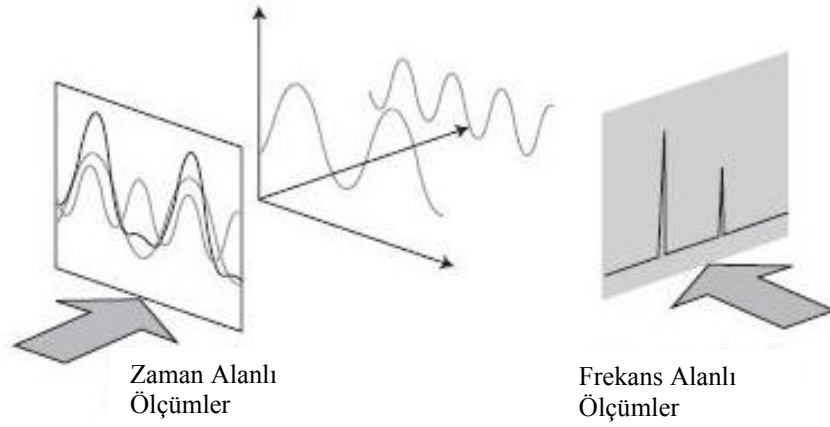
bilgi edinmemize yardımcı olur. Bu frekans değeri kullanımı birçok bilim dalında standart hale gelmiştir.

Sinyal işlemenin yüzyıla aşkın zaman önce babası olarak kabul edilen, Fourier bir sinyalin sinüs ve cosinüs sinyallerinin eklenmesi ile elde edilebileceğini ispatlamıştır. Fourier sinyalleri genlik, frekans ve faz olarak toplamış veya çıkartmış ve yeni veri bilgileri elde etmiştir. Veri bilgileri kaybolmamış ve yeni sinyaller elde etmiştir, tabi ki yeni sinyallerden eski sinyallere ulaşılabilir. Bir dalga formunun iki sinüs dalgasının birleşiminden oluştuğu Şekil 3.2’de görülmektedir.



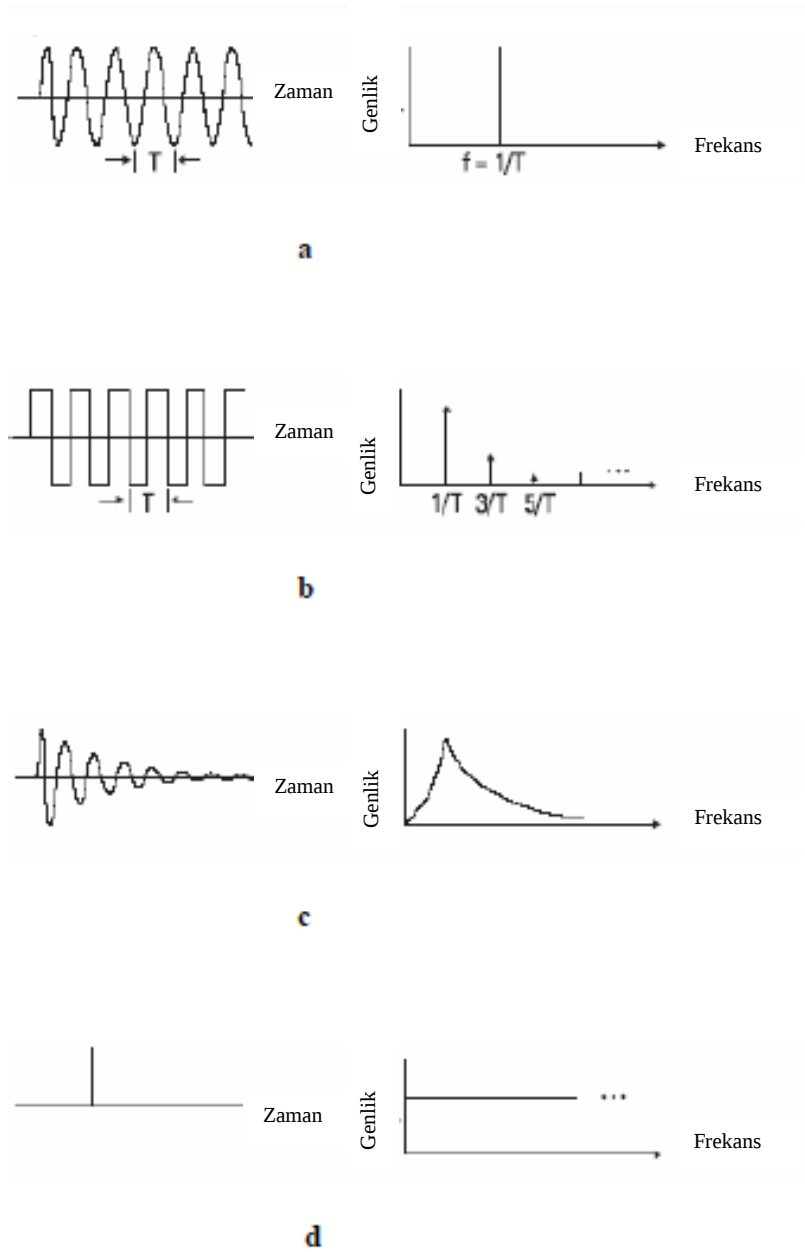
Şekil 3.2 : İki sinyalin birleşimi

Fourier’in de göstermiş olduğu gibi ve şu anda da çok kullanılan bir veri sinyali, sinüs sinyallerinin genlik, frekans ve faz değerleri doğru şekilde seçilerek birleştirilmesi ile elde edilebilir. Veya bir veri sinyali birden fazla sinüs sinyaline ayrıştırılabilir.



Şekil 3.3 : Zaman-Frekans-Genlik Düzlemi

Sinyaller, sinüs sinyallerinin zaman-genlik veya zaman-frekans bölgelerinde gösterilebilir (Şekil 3.3). Sinyallerin frekans bölgesindeki gösterimine sinyal spektrumu denir, her bir spektrumdaki çizgi ise sinyalin bileşeni olarak adlandırılır. Frekans spektrumunu sinyali ifade etmede kullanırız. Esasında frekans spektrumuna, sinyalin frekans bilgisinin, grafiksel gösterimi de diyebiliriz.



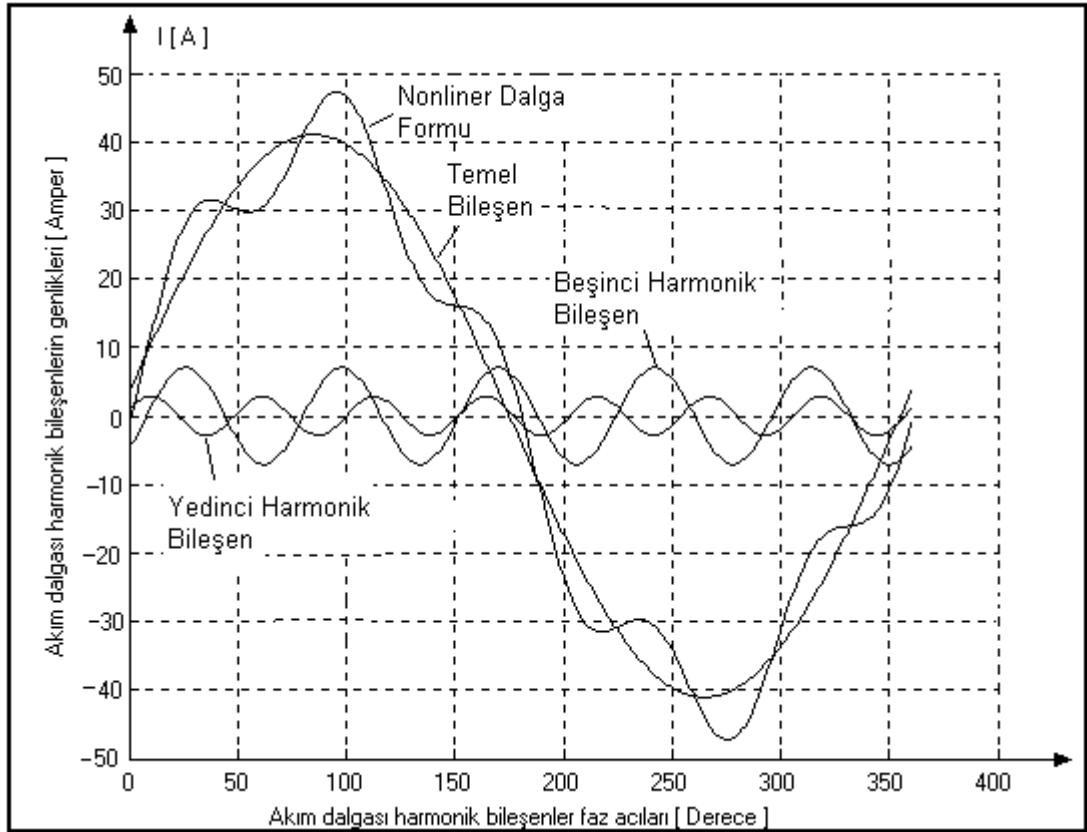
Şekil 3.4 : Bazı temel sinyallerin frekans spektrumları; a) sinüs dalgası. b) kare dalga. c) sönümlü dalga. d) dürtü.

3.2 Fourier Analizi

Fransız bilim adamı olan Jean Baptise Joseph Fourier (1768-1830), sinyalleri sinüzoidal bileşenlere ayıştırmıştır ve Fourier analizi olarak tarihe ismini yazdırmıştır. Fourier, sürekli bir sinyali, düzgün seçilmiş sinüzoidal sinyallerin toplamı biçiminde göstermeyi başarmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.5’de dört sinyalin yaklaşık sinüzoidal bileşenleri gösterilmektedir. Bu şekillerde siyah tonda verilen

sinyaller, renkli olan harmoniklerin toplamını ifade eder. Başka bir ifadeyle, bir periyodik fonksiyonun, sonsuz sayıdaki kompleks üstel fonksiyonları toplamıyla ifade edilebileceği kanıtlanmıştır. Bu yüzden durağan sinyallerde yani devamlı sinyallerde Fourier dönüşümü iyi netice verir ama durağan olmayan sinyallerde ise istenen sonuçlar gözlemlenememiştir.

Fourier dönüşümünde, ham veri sinyali, bir çok sinüzoidal frekanstan oluşmaktadır. Fourier dönüşümü esasında bir sinyali zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştürür. Bu dönüşümde bir dezavantaj da söz konusudur; sinyalin zaman bilgisinin kaybolması. Yani bir sinyalin Fourier dönüşümüne bakıldığında, özel bir olayın nerede gerçekleştiğine dair bir şey söylemek imkansızdır.



Şekil 3.5 : Bazı sinyallerin sinüzoidal bileşenleri

Fourier analizi matematikte Fourier serileri altında incelenir. Periyodik olan bir $f(x)$ fonksiyonu sonsuz sayıdaki sinüs ve kosinüslerin toplamının bir açılımı olarak ifade edilir. Bir fonksiyonun, sinyalin, analizinde Fourier serileri, sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının ortogonal ilişkilerini kullanarak analiz yapar.

3.2.1 Fourier serileri

Çevremizde gözlenen olaylar, zamana ya da konuma bağlı olarak gelişmektedir. Gözlenen olay zamanın fonksiyonu ise zaman ortamı, konumun fonksiyonu ise konum ortamı söz konusudur. Olayın frekansa göre gelişimi ele alınırsa yani frekansın bir fonksiyonu olarak değerlendirilirse frekans ortamından söz edilir.

Zaman ortamında kaydedilen bir sinyal, frekans ortamına aktarılarak istenmeyen bileşenler ayıklandıktan sonra tekrar zaman ortamına geri dönülebilir. Frekans ortamında yapılan bu işlem, zaman ortamında yapılmak istense, bir takım sorunlarla karşılaşılabilirdi. Bu tür, herhangi bir ortamda gözlenmiş sinyalin başka bir ortama aktarılmasına dönüşüm, aktarma tekniklerine de, dönüşüm yöntemleri denir. Günümüzde, Fourier, Laplace, Hankel, Hilbert, Z dönüşümü gibi çeşitli dönüşüm yöntemleri geliştirilmiştir (Goodman,1996).

Fourier dönüşümleri, sinyal işlemede önemli ölçüde kullanılmaktadır. Her sinyal, temelde belirli frekansa sahip bir sinyal ile bu frekansın katlarına sahip farklı sinyallerin değişik oranlarda doğrusal biçimde birleşmesinden meydana gelir.

2π periyodlu bir $f(t)$ fonksiyonu bazı koşullar sağladığında trigonometrik bir seri ile gösterilebilir (Yarasa 1976).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt + b_n \sin nt \quad (3.1)$$

şeklinde olan bu seriye Fourier serisi denir. 2π periyodlu $f(t)$ fonksiyonunun (3.1) serisi ile ifade edilmesi Dirichlet şartları ile sağlanmıştır. Şimdi Dirichlet şartlarını ele alalım.

2π periyodlu $f(t)$ fonksiyonu $(-\pi, \pi)$ aralığında tanımlanmış bir fonksiyon olsun. Eğer bu fonksiyon aşağıdaki şartları sağlıyorsa bu fonksiyona Dirichlet şartlarına sahip bir fonksiyon, bu şartlara da Dirichlet şartları denir.

(a) $f(t)$, $(-\pi, \pi)$ aralığında sürekli veya parçalı sürekli bir fonksiyondur. Burada $[a; b]$ aralığında parçalı sürekli fonksiyondan şu anlaşılır:

$[a; b]$ aralığında $a = t_1 < t_2 < \dots < t_n = b$ özelliğine sahip sonlu sayıda $t_1; t_2, \dots, t_n$ noktalarını alalım. Eğer $f(t)$ fonksiyonu her $t_i < t < t_{i+1}$ alt aralığında(içinde) sürekli

ve aralığın uç noktalarına her iki taraftan yaklaşması halinde, yani sağdan $f(t_i + 0)$ ve soldan da $f(t_{i+1}-0)$ yaklaşıldığında sonlu limitlere sahipse o zaman $f(t)$ ye bu aralıkta parçalı sürekli fonksiyon denir.

(b) $f(t)$ fonksiyonunun bir peryod içindeki maksimum ve minimumları sonlu sayıda olmalıdır $f'(t)$ türevi parçalı sürekli olabilir. (a) ve (b) koşullarını sağlayan fonksiyonlara parçalı düzgün sürekli denir.

(c) $f(t)$ fonksiyonu bir peryod aralığında mutlak integrallenebilirdir. Yani

$$\int_{-\pi}^{\pi} |f(t)| dt = \text{sonlu} < \infty \quad (3.2)$$

olmalıdır.

Özellikle $t = -\pi$ uç noktasında fonksiyonun aldığı değer t nin sağdan $-\pi$ ye yaklaşırken aldığı $f(-\pi + 0)$ değeridir. $t = \pi$ için de $f(\pi-0)$ değeri anlaşılacaktır. Bunlar eşit veya farklı olabilirler.

$(-\pi; \pi)$ aralığında tanımlanan 2π peryodlu $f(t)$ fonksiyonu, Dirichlet koşullarını sağladığından $(-\pi; \pi)$ aralığında (2.1) Fourier serisi ile gösterilebilir.

1) Serinin değeri, $f(t)$ nin sürekli olduğu bütün noktalarda (aralığın içinde) $f(t)$ nin değerine eşit,

2) Serinin değeri, süreksiz noktalarında,

$$\frac{f(t+0)+f(t-0)}{2} \quad (3.3)$$

değerine eşit

3) Serinin değeri, aralığın uç noktalarında yani $t = -\pi$, $t = \pi$ noktalarında,

$$\frac{f(-\pi+0)+f(\pi-0)}{2} \quad (3.4)$$

ifadesine eşit olur.

Bunların sonucu olarak, $f(t)$ nin Fourier serisi

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt + b_n \sin nt \quad (3.5)$$

veya

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(nt + \varphi_n) \quad (3.6)$$

şeklinde yazılır. Buradaki (3.6) serisinin $c_n \cos(nt + \varphi_n)$ genel terimine $f(t)$ fonksiyonunun n . harmonik fonksiyonu denir. Burada a_0 ; a_n ; b_n ler Fourier katsayılarıdır.

3.2.2 Ortogonal fonksiyonlar

$\{\varphi_n(t)\}$ fonksiyon dizisinin her hangi iki fonksiyonu (a, b) aralığında

$$\int_a^b \varphi_m(t) \varphi_n(t) dt = \begin{cases} 0, m \neq n \text{ için} \\ \neq 0, m = n \text{ için} \end{cases} \quad (3.7)$$

eşitliğini sağlıyorsa $\{\varphi_n(t)\}$ dizisi (a, b) aralığında Ortogonaldır denir.

Bu durumda, dizinin her bir $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, ..., $\varphi_n(t)$ elemanı diğerinin ortogonalidir. Dolayısıyla bu fonksiyonlar (a, b) de ortogonal bir cümle oluştururlar.

3.2.3 Euler- fourier formülü

$\{\varphi_n(t)\}$ fonksiyonlar cümlesi (a, b) de ortonormal bir cümle ve $f(t)$ fonksiyonu da

$$f(t) = c_1 \varphi_1(t) + c_2 \varphi_2(t) + \dots + c_n \varphi_n(t) + \dots \quad (3.8)$$

şeklinde bir seri ile ifade edilmiş olsun. Burada $f(t)$ fonksiyonu (a, b) de integrallenebilen bir fonksiyondur. Bu serideki c_n katsayılarını belirlemek için (3.8) ifadesinin her iki yanını soldan $\varphi_n(t)$ ile çarparsak,

$$f(t) \varphi_n(t) = c_1 \varphi_1(t) \varphi_n(t) + c_2 \varphi_2(t) \varphi_n(t) + \dots + c_n \varphi_n^2(t) + \dots \quad (3.9)$$

olacaktır. Elde edilen bu ifadenin her iki yanını terim terime, a dan b ye kadar integre edersek, ($m \neq n$) olan terimlerin integrali sıfır olacağından, yalnız $c_n \varphi_n^2(t)$ terimli integral kalacaktır. Böylece,

$$\int_a^b f(t) \varphi_n(t) dt = c_n \int_a^b \varphi_n^2(t) dt = c_n \quad (3.10)$$

$$c_n = \int_a^b f(t) \varphi_n(t) dt \quad (3.11)$$

olur. Bu da c_n katsayılarını belirler. Bulunan (3.11) formülüne Euler-Fourier formülü denir. c_n katsayılarına $\{\varphi_n(t)\}$ yardımıyla elde edilen Fourier katsayıları ve (3.10) şeklindeki seriye de $\{\varphi_n(t)\}$ ile ilgili Fourier serisi denir (Genelleştirilmiş Fourier Serisi) (Hwei P.H. 1967, Yarasa 1976).

3.2.4 Fourier katsayıları

(3.5) de ifade edilen $f(t)$ nin trigonometrik Fourier Serisindeki $\{\varphi_n(t)\}$ ortogonal cümle

$$\{1, \sin t, \cos t, \sin 2t, \cos 2t, \dots, \sin nt, \cos nt\} \quad (3.12)$$

şeklindedir. Diğer yandan,

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos nt dt \quad (3.13)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin nt dt$$

eşitlikleriyle ifade edilen a_0 ; a_n ; b_n bulunur. Bulunan bu a_0 ; a_n ; b_n ifadeler Fourier Katsayıları için formüllerdir (Schwartz 1966, Stein 1971, Yarasa 1976). Verilmiş bir fonksiyonun (3.5) Fourier serisi

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt + b_n \sin nt \quad (3.14)$$

açılımına Harmonik Analiz denir. (3.5) serisinin terimleri 2π periyodlu periyodik fonksiyonlardır. Eğer bu seri $(-\pi, \pi)$ aralığında yakınsak ise t nin bütün değerleri içinde yakınsaktır. Buna ilave olarak, serinin 2π periyodik tekrarlamada aldığı değer (serinin toplamı), $(-\pi; \pi)$ aralığında aldığı değere eşittir.

Ayrıca Fourier Serisi $(-\pi; \pi)$ aralığının dışında da 2π periyodu ile $f(t)$ yi ifade eder. a_0, a_n, b_n katsayılarını veren formülleri herhangi 2π uzunluklu bir aralıkta da geçerlidir. Bu halde (3.13) integralinin alt ve üst sınır değerleri α dan $\alpha+2\pi$ ye kadar olur(α herhangi bir açı)

Eğer $f(-\pi + 0) \neq f(\pi - 0)$ ise, $t = \pm\pi$ uç noktaları süreksizlik noktaları olur. $(-\pi, \pi)$ de sürekli olan fonksiyon, periyodik tekrarlamadan dolayı uç noktalarda süreksiz olmaktadır.

3.3 Walsh Analizi

Sinüs ve kosinüs fonksiyonları, birçok mühendislik alanının gelişmesinde temel bir sistem oluşturur. Walsh ve Haar fonksiyonlar kümesi, ortogonal fonksiyonların en önemlisini oluşturur. Bu fonksiyonlar sadece iki durumda sınıflandırılır. Bunlar; sayısal mantık davranışına ve sinüs ve kosinüs serilerinin etkin hileli özelliklerinin çoğuna sahip olmasıdır.

Haar serileri, ilk olarak bir Macar matematikçi olan Alfred Haar tarafından 1910 yılında tanımlanmıştır. Alfred Haar verilen fonksiyona yakınsayan yeni fonksiyonlarda, genişletilmiş yapıda sürekli bir fonksiyon veren ve sadece iki değer alabilen bir ortogonal fonksiyonlar kümesi önermektedir. Ortogonal seriler için önerilen teoriler Göttingen’de Schmidt tarafından yeni yüzyıla girerken geliştirilmiştir.

Walsh fonksiyonları, ilk olarak bir Amerikan matematikçi olan J. L. Walsh tarafından 1923 yılında tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar aynı zamanda tam bir ortogonal kümedir ve sadece +1 ve -1 değerlerini alır, bununla birlikte bu fonksiyonların trigonometrik serilerle benzerlik gösterdiği bulunmuştur. Walsh fonksiyonlarının ortaya çıkışından önce bir Alman matematikçi olan H. Rademacher, Walsh fonksiyonlarına tamamlanmamış fakat doğru bir alt küme sunmuştur. Bu fonksiyon kümeleri işaret işleme ve haberleşmede yeni bir yöntemin temelini oluşturmuştur. 1931 yılında başka bir Amerikan matematikçi olan Raymond Paley

tarafından Walsh fonksiyonlarının tamamen farklı bir tanımlaması yapılmıştır. Çeşitli Alman ve Amerikan matematikçiler ilerleyen yıllarda da bu konu üzerine çalışmalar yapmıştır.

3.3.1 Walsh fonksiyonlarının tanımı

Walsh fonksiyonları, esas olarak Fourier analizinde kullanılan kosinüs ve sinüs fonksiyonlarının sayısal cevabıdır. Başka bir ifadeyle sayısal bir şekilde ifade edilmesidir. Fourier serileri seçilmiş frekanslardaki saf kosinüs ve sinüs dalgalarının toplamı olarak oluşturulan dalga işaretidir. Fourier serileri karmaşık işlemler içerir ve yüksek matematik bilgisi gerektirir. Walsh fonksiyonlarında birkaç ana temel düşünce esas alınarak çalışılabilir.

Genellikle işaret işlemede, görüntü işlemede, wavelet uygulamalarında, spektrum ölçümlerinde kullanılır. Bununla birlikte Walsh fonksiyonları, harmonik analizinde de kullanılan bir yöntemdir.

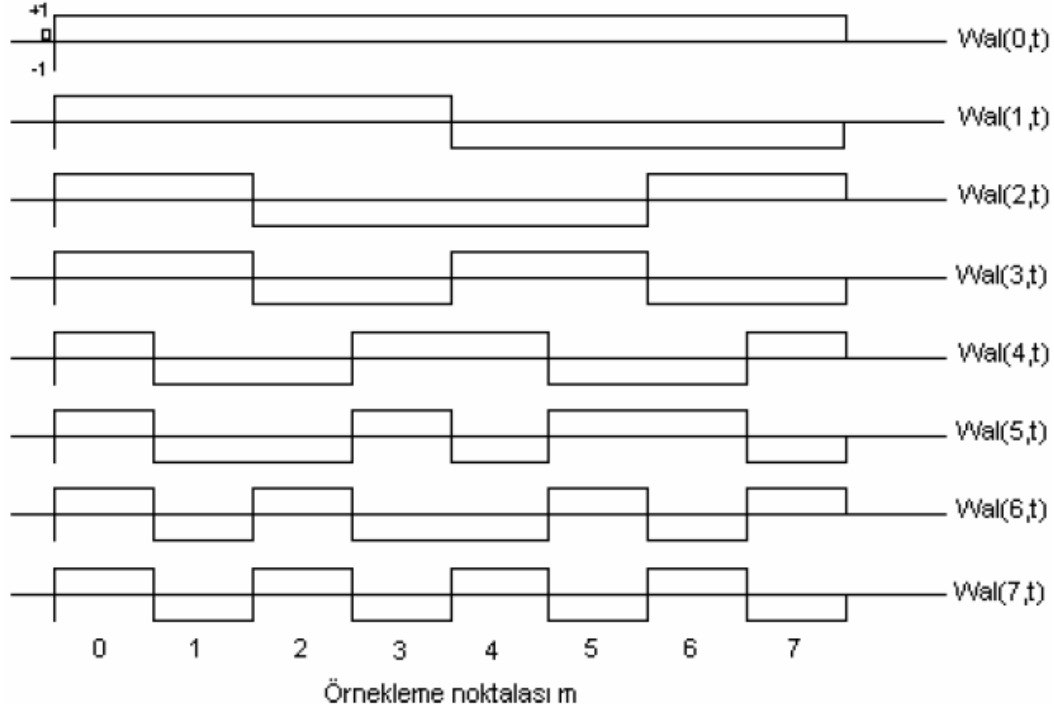
Walsh fonksiyonları, sadece +1 ve -1 genlik değeri alan kare dalga işaretlerinin düzenlenmiş tümüyle ortogonal bir kümeden oluşmaktadır ve birçok özelliğinin trigonometrik serilere benzemektedir ve sınırlandırılmış bir zaman aralığında tanımlanır. Parçalı sabit ortogonal fonksiyondur. Sinüs ve kosinüs fonksiyonları gibi iki bağımsız değişken, Walsh fonksiyonlarının tanımlanmasında yeterlidir. Bu iki değişkenden biri t (bir zaman periyodu), diğeri ise n (frekansla ilişkili olarak sıra numarası)'dır.

Walsh fonksiyonu matematiksel olarak eşitlik (3.15)'deki gibi ifade edilir.

$$\text{Wal}(n,t) \quad (3.15)$$

Sürekli zamanda ardışık sıralı (sequency order) Walsh fonksiyonu için Walsh'ın gerçek sırası $\text{Wal}(n,t)$ 'dir. M eşit uzaklık noktalarıyla örneklenen $\text{Wal}(n,t)$, birbirini takip eden ayrık zaman formuyla ilişkili olarak elde edilir, $\text{Wal}(n,m)$ olarak belirtilir. Bu yapıda bir normalize periyot M alt aralığa bölünmüştür. $\text{Wal}(n,m)$ bir normalize edilmiş zaman periyodunda m/M ve $m + 1/M$ aralığındaki $\text{Wal}(n,t)$ 'nin değerini gösterir.

İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları Şekil 3.6'da gösterilmiştir



Şekil 3.6 : Ardışık sıralı düzenlenmiş Walsh fonksiyonlarının bir dizisi

Çizelge 3.1 : İlk sekiz ayrık zamanlı sıralı Walsh fonksiyonları $Wal(n,m)$

Walsh Fonksiyon Sırası (n)	Örnekleme Noktası (m)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
n=1	1	1	1	1	1	1	1	1
n=2	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
n=3	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
n=4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
n=5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
n=6	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
n=7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
n=8	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

Walsh serileri sin ve kos serileriyle benzerlik gösterir. Bu benzerlik denklem (3.15)' de eşitlik olarak verilmektedir. Walsh fonksiyonları orta veya sıfır zaman noktasıyla

ilişkili olarak simetriktir. Fonksiyon $-\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2}$ aralığında tanımlandığında doğrudan simetriktir (cal fonksiyonu) veya ters olarak simetriktir (sal fonksiyonu).

Sin ve kosinüs fonksiyon serisinin toplamı olarak $f(t)$ denklem (3.16)'da ifade edilmiştir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (3.16)$$

Sinüs ve kosinüs fonksiyon serilerinin toplamını ifade eden $f(t)$ eşitliğindeki a_0, a_k, b_k katsayıları denklem (3.17)'deki eşitlikler yardımıyla bulunur.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_0 t dt \quad (3.17)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_0 t dt$$

Bir zaman serisi olan $f(t)$, Walsh fonksiyonlarının serisinin toplamında benzer yolla tanımlanırsa Walsh fonksiyonları denklem (3.18)'deki gibi tanımlanır.

$$f(t) = a_0 Wal(0, t) + \sum_{n=1}^{N-1} a_n Wal(n, t)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) Wal(0, t) dt \quad (3.18)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) Wal(n, t) dt$$

Cal ve Sal olarak tanımlı iki serinin toplamı kullanılarak denklem (3.19)'daki eşitlik elde edilir.

$$b_j = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) Cal(j, t) dt$$

$$a_i = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) Sal(i, t) dt \quad (3.19)$$

Cal ve Sal formunda sinüs-kosinüs serilerine benzer şekilde Walsh serileri denklem (3.20)'deki gibi ifade edilebilir.

$$f(t) = a_0 Wal(0, t) + \sum_{i=1}^{N/2} \sum_{j=1}^{N/2-1} [(a_i Sal(i, t)) + (b_j Cal(j, t))] \quad (3.20)$$

a_i ve b_j katsayılarının iki yeni serisi $f(t)$ 'nin ardışık tanım kümesinde birlikte ifade edilir. $Wal(0, t) = Cal(0, t)$ 'dir. Dikkat edilirse denklem (3.20)'deki ifadede Cal terimleri sayısı Sal terimlerinden daha az olmaktadır. Bu katsayı serilerinin türevleri, $f(t)$ 'nin benzer bileşenleri içinde ayrıştırılmış olarak gösterilir, ancak bu bileşenler artık sinüsoidal formda değildir. Walsh serisine ait Sal ve Cal fonksiyonlarından elde edilen bu iki farklı seriye, $f(t)$ 'nin tam sıralı davranışını açıklamak için ihtiyaç duyulur.

3.3.2 Fourier ve walsch serilerinin arasındaki ilişki

Denklem (3.16) ve (3.18)'den normalize edilmiş bir seri için görülür ki; $0 \leq t \leq 1$ açık aralığında $Wal(0, t) = 1$ olduğundan $a_0/2$ için Fourier ve Walsh serilerinin ortalama değerlerinin eşit olduğu görülmektedir.

Denklem (3.16)'da verilen kosinüs katsayıları için, denklem (3.20)'deki ifade de yerine kullanılabilir, bu şekilde denklem (3.21) elde edilir.

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_i Sal(i, t) + b_j Cal(j, t) \right] \cos k\omega_0 t dt \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'de integral alma işlemi düzenlendiğinde denklem (3.22) elde edilir.

$$a_k = a_0 + \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{\infty} a_i \left[\int_0^T Sal(i, t) \cos k\omega_0 t dt \right] + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} a_j \left[\int_0^T Cal(j, t) \cos k\omega_0 t dt \right] \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'daki köşeli parantez içindeki terimler sırasıyla $Sal(i, t)$ ve $Cal(i, t)$ için Fourier katsayıları sırasıyla gösterilirse; $a_k Sal$ ve $a_k Cal$ şeklinde yazılırsa denklem (3.23), denklem (3.24) elde edilir.

$$a_k = a_0 + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} [a_i a_k Sal + b_j a_k Cal] \quad (3.23)$$

$$b_k = a_0 + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} [a_i b_k \text{Sal} + b_j b_k \text{Cal}] \quad (3.24)$$

a_k ve b_k için Walsh serisi terimleri olarak denklem (3.16)' de yerine koyularak denklem (3.25)'de gösterilen Fourier serileri bulunur.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \left[a_0 + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} [a_i a_k \text{Sal} + b_j a_k \text{Cal}] \cos(k\omega_0 t) \right] + \left[a_0 + \frac{2}{T} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} [a_i b_k \text{Sal} + b_j b_k \text{Cal}] \right] \sin(k\omega_0 t) \right\} \quad (3.25)$$

Walsh ve Fourier serilerinin her ikisi de ortogonal terimler içerdiklerinden a_0 , $a_i a_k \text{Sal}$, $b_i b_k \text{Cal}$ yok edilirse denklem basitleşir ve denklem (3.26) elde edilir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} [a_i b_k \text{Sal} \sin(k\omega_0 t) + b_j a_k \text{Cal} \cos(k\omega_0 t)] \quad (3.26)$$

Denklem (3.26) sınırlandırılmış ve normalize edilmiş basit bir şekle getirilirse denklem (3.27) elde edilir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \left[a_i b_k \text{Sal} \sin(2\pi k \frac{i}{N}) + b_j a_k \text{Cal} \cos(2\pi k \frac{j}{N}) \right] \quad (3.27)$$

3.3.3 Walsh fonksiyonlarının sıralanması

Walsh fonksiyonlarında sıralama yapmak için genellikle iki önemli yöntem kullanılmaktadır. Farklı kaynaklardan elde edilen algoritma ve sonuçlar karşılaştırıldığı zaman, iyi tanımlanmış yöntemler kullanılmazsa karışıklıklar ortaya çıkabilir. Aradığımız şey, diğer ortogonal fonksiyonlarla birlikte pratik deneyimlerle ilişkili, sayısal ve analitik amaçlar için belirlenmesi kolay olan bir fonksiyonda, temeli sıfır geçiş sayısına dayalı bir sıralamadır. Aşağıda tanımlanan bu iki sıralama yönteminin hiçbiri Walsh teorisi uygulamalarında ayrı ayrı rol oynadığından bahsedilen her iki gereksinimi aynı anda karşılayamaz. Walsh fonksiyonlarının ardışık sıralama ve doğal sıralama yöntemi olmak üzere iki sıralama yöntemi bulunmaktadır.

3.3.3.1 Ardışık sıralama (sequency order)

Bu yöntem, J. L. Walsh' in oluşturduğu özgün bir sıralama yöntemidir. Bu yöntemde, bileşenler sıfır geçişinin artan sırasında düzenlenmektedir ve direk olarak artan harmonik sayısında düzenlenmiş Fourier bileşenleri içeren frekansla ilişkilidir. Walsh fonksiyonlarının ardışık sıralama yöntemi kullanılarak oluşturulan hali Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

3.3.3.2 Doğal sıralama (natural order)

Bu sıralama yöntemi, ardışık Rademacher fonksiyonlarından elde edilen bir sıralamadır. Paley tarafından ilk defa kullanılmıştır ve $PAL(n,t)$ olarak gösterilmektedir. Bu sıralama yönteminin Gibbs, Ahmed, Yuen ve diğerleri tarafından ortaya konulan analitik ve hesaba dayalı avantajları vardır. Özellikle Gibbs göstermiştir ki; bir lojik diferansiyel operatörün kök fonksiyonları olarak tanımlanabilir.

Doğal sıralama, teorik matematik çalışmalarında, görüntü iletiminde ve hızlı bir hesaplama için kullanılır. Ardışık sıralama ise haberleşme ve işaret işleme (spektral analiz ve filtreleme gibi) alanlarında sıkça kullanılmaktadır.

3.3.4 Walsh fonksiyonlarının türetilmesi

Walsh fonksiyonlarını oluşturmak için birkaç yol vardır;

- Bir fark eşitliği aracılığıyla
- Rademacher fonksiyonlarının üretilmesinden
- Hadamard matrisinin aracılığıyla
- Boolean sentezini kullanarak elde edilebilir.

Bu çalışmada, Hadamard matrisini kullanarak Walsh fonksiyonları elde edilmektedir. Hadamard matrisi, yalnızca +1 ve -1 değerlerini alan tüm kolonları karşılıklı ortogonal olan matristir.

En küçük Hadamard matrisi denklem (3.28)' deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Bir Hadamard matrisi tüm sütunlar ortogonal olduğundan rasgele sıralanabilir. Bununla birlikte Walsh fonksiyonlarının elde edilişine kadar önemli üç sıralama vardır:

En küçük Hadamard matrisi kullanılarak $N=8$ için doğal sıralama yapılırsa Şekil 3.7'de elde edilir. Doğal sıralama, Walsh fonksiyonlarının elde edilişindeki ilk sıralamadır.

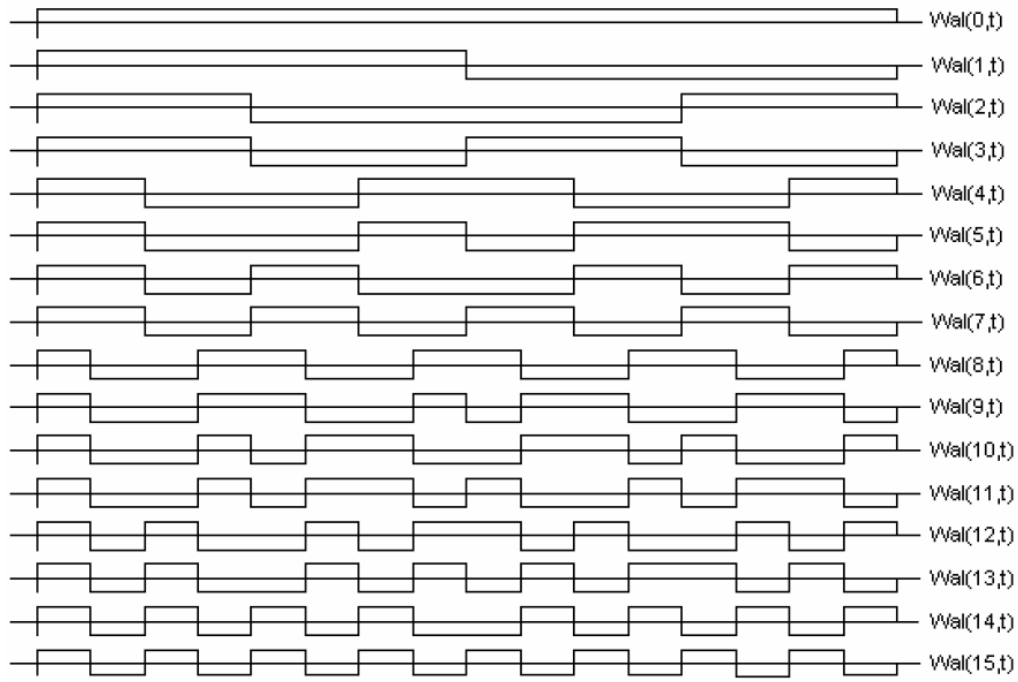
Sıra	matris
0	1 1 1 1 1 1 1 1
1	1 -1 1 -1 1 -1 1 -1
2	1 1 -1 -1 1 1 -1 -1
3	1 -1 -1 1 1 -1 -1 1
4	1 1 1 1 -1 -1 -1 -1
5	1 -1 1 -1 1 -1 1 -1
6	1 1 -1 -1 -1 -1 1 1
7	1 -1 -1 1 -1 1 1 -1

Şekil 3.7 : Hadamard matrisi kullanılarak elde edilen doğal sıralama

Doğal sıralama yapıldıktan sonra Hadamard-Walsh dönüşümünde ardışık dizi sıralama yapılır. Bu sıralama, Fourier dönüşümündeki sinüs ve kosinüslerin bir analog satırındaki sinyal değişimlerinin sayısına dayanır. Dönüştürülmüş veri artan frekansta sıralanır. Yapılan ardışık sıralama Şekil 3.8’de gösterilmektedir.

Sıra(H)	matris	değişmiş sıra(W)
0	1 1 1 1 1 1 1 1	0
4	1 1 1 1 -1 -1 -1 -1	1
6	1 1 -1 -1 -1 -1 1 1	2
2	1 1 -1 -1 1 1 -1 -1	3
3	1 -1 -1 1 1 -1 -1 1	4
7	1 -1 -1 1 -1 1 1 -1	5
5	1 -1 1 -1 -1 1 -1 1	6
1	1 -1 1 -1 1 -1 1 -1	7

Şekil 3.8 : Hadamard- Walsh dönüşümünde ardışık dizi sıralaması

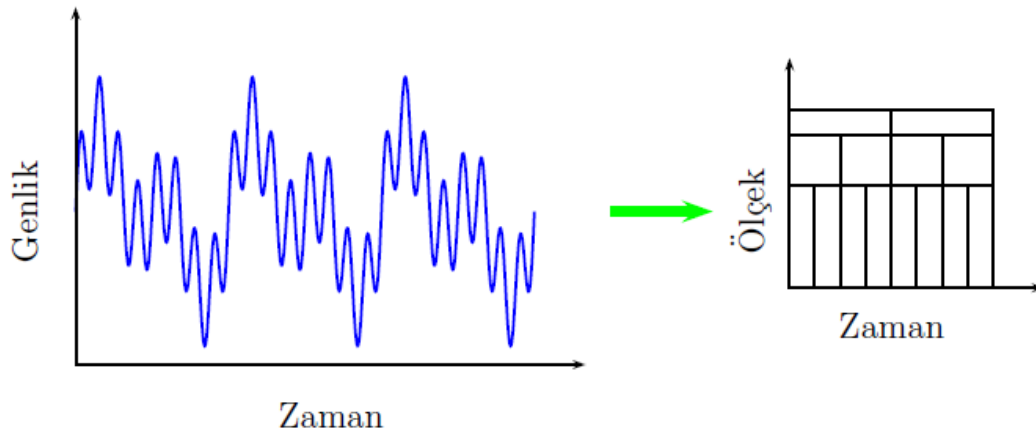


Şekil 3.9 : N=16 için ardışık düzenlenmiş Walsh fonksiyonları

Örneğin N=16 aralık için Hadamard matrisi aracılığıyla üretilen Walsh fonksiyonları Şekil 3.9’da görülmektedir.

3.4 Dalgacık Analizi

Dalgacık analizi değişken boyutlu bölgelerde pencereleme tekniğidir. Ayrıca hem uzun zaman aralığında alçak frekans bilgisini hem de kısa zaman aralığında yüksek frekans bilgilerini belirlememize yardımcı olur. Yani bir bakışta hem ormanı hem de ağaçları görmektir (Graps, 2006).



Şekil 3.10 : Dalgacık Analizi

Dalgacık analizi; kısa zaman Fourier analizinin aksine zaman-frekans alanını değil, zaman-ölçek alanını kullanır (Şekil 3.10). Şekilde görüldüğü üzere analiz sonucu tek boyutlu bir çizgi değil, alanlar oluşur.

Dalgacık analizi ne iş yapar? Dalgacık analizinin en önemli avantajı yerel analizi yapabilmesidir. Yani büyük sinyali küçük alanda analiz edebilmesidir. Örneğin küçük bir süreksizlik noktası olan bir sinüs sinyalini düşünelim. Böylesi bir sinyal gerçek hayatta deneysel olarak kolayca bulmak mümkündür. Bu sinyalin Fourier analizi sonucunda elde edilen spektral bileşenlerin çizimi ilginç birşey ifade etmez. Çünkü karşımıza sinyali temsil eden düz bir spektrum (2 zirve) çıkar. Buna karşın dalgacık analizi sonucunda elde edilen spektral bileşenlerin çizimi zaman içerisindeki süreksizliğin kesin yerini gösterir.

İşte dalgacık analizi boşluklu, eğimli, kırılma noktalı, süreksizlik noktası bulunan sinyallerin analizinde kullanılan uygun bir analiz yöntemidir. Bunların yanı sıra geleneksel yöntemlere göre karşılaştırıldığında dalgacık analizi yardımıyla bir sinyali sıkıştırma (compression) veya arındırma (de-noising) işlemi sinyalin orijinalini bozmadan kolayca yapılabilir (Misiti vd., 2004).

3.4.1 Dalgacığın matematiksel temelleri

Kısa zaman Fourier analizinde bir pencere fonksiyonu bulunurken, dalgacık analizinde bir dalgacık ($\psi(x)$) fonksiyonu kullanılmaktadır. Söz konusu dalgacık fonksiyonu ölçeklendirilip ve zaman alanında kaydırılarak analiz işlemi gerçekleştirilir. Bu durumda, öncelikle dalgacığın matematiksel tanımını yapalım ve çeşitleri hakkında bilgi edinelim.

Dalgacık nitelik yönünden ele alınacak olunursa, öncelikle aşağıdaki iki şartı sağlayan bir gerçek değerli fonksiyon $\psi(x)$ olması gerekir (Percival ve Walden, 2002):

- ψ 'nin integrali sıfırdır:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (3.29)$$

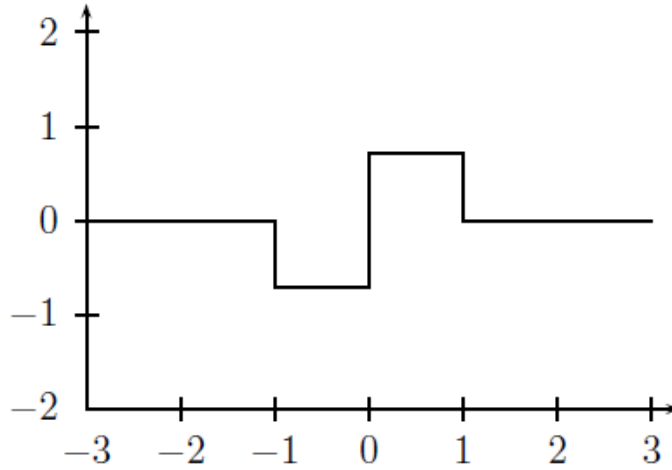
- ψ 'nin karesinin integrali bire eşittir:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(x) dx = 1 \quad (3.30)$$

Yukarıdaki eşitlikleri sağlayan her $\psi(x)$ fonksiyonu dalgacık olarak adlandırılır. Örneğin en basit anlamda yukarıdaki eşitliği sağlayan en temel dalgacık fonksiyonu Haar dalgacığı olarak bilinmektedir. Bu dalgacığın matematiksel gösterimi

$$\psi^H(x) \equiv \begin{cases} -1/\sqrt{2}, & -1 < x \leq 0 \\ 1/\sqrt{2}, & 0 < x \leq 1 \\ 0, & \text{aksi takdirde.} \end{cases} \quad (3.31)$$

şeklindedir. Şekil 3.11 söz konusu dalgacığın grafiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.11 : Haar dalgacığı

3.4.1.1 Sürekli dalgacık dönüşümü

Sürekli dalgacık dönüşümü, işaretin ya da zaman serisinin zaman-frekans-ölçek ekseninde incelenmesine imkan verir. İşaret, sürekli dalgacık dönüşümünde (SDD) dalgacık adı verilen zamanda ötelenebilen, genişliği değiştirilebilen bir fonksiyonla çarpılır. Analiz boyunca, adım adım öteleme sağlanarak her adımda o adımdaki dalgacık ve sinyalin çarpılmasıyla katsayılar elde edilmiş olur. İşaretin tamamı geçilip sonuna ulaşıldığında ise dalgacık katsayılarından oluşan bir küme elde edilir. Yapılan bu işlemler ölçeği değiştirilmiş yeni dalgacıklarla tekrarlanır. Böylece başka bir ölçekte de dalgacık katsayıları kümesi elde edilmiş olur. Her ölçekte dalgacık katsayıları zamanın bir fonksiyonu şeklinde ayrı ayrı ele alınır. Sürekli dalgacık dönüşümünde en çok kullanılan dalgacık tipi Morlet dalgacığıdır.

Sürekli dalgacık dönüşümü işlemi (SDD) şu şekilde ifade edilir (Drago ve Boxall, 2002).

$$SDD_x^\psi(\tau, s) = \psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (3.32)$$

$$\psi_{\tau,s} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3.33)$$

Burada SSD, t (öteleme) ve s (ölçek) parametrelerinin bir fonksiyonudur. $\psi_{\tau,s}$,dönüşüm fonksiyonudur ve ana dalgacık fonksiyonu olarak adlandırılır. $x(t)$ ise analiz edilecek işarettir. Dönüşümde kullanılan farklı genişliğe sahip alt pencere fonksiyonları da ana dalgacıktan ölçekleme yoluyla türetilir.

Ölçek parametresi (s) 1/frekans olarak tanımlanır. Ölçek değeri küçük ise yani yüksek frekanslardaki işarettaki detaylar elde edilir. Ölçek değeri büyük ise düşük frekanslardaki işaret hakkında bilgi elde edilir.

Dalgacık fonksiyonunun işaretle ötelenerek çarpımı ile dalgacık dönüşümü katsayıları (C) elde edilir. Bu katsayılar dalgacık fonksiyonu ile işaret arasındaki benzerliği ortaya koyarlar, eğer ilişkileri yüksek ise C katsayısı yüksek değerler alır. Burada bulunan her katsayı o ölçekte dalgacık fonksiyonu ile işaret arasındaki korelasyonu göstermektedir ve bu katsayının yüksek olması o andaki ilişkinin yüksek olmasını yani o dalgacık fonksiyonunun içerdiği frekans bilgisinin işarete bulunduğu anlamına gelir. Bu da işarete o frekans değerine ait spektral bileşeni ortaya çıkarır. Dalgacık fonksiyonu farklı ölçekler kullanılarak işaret üzerinde tüm zaman boyunca çarpılır. Böylece işaretin ölçek-zaman-frekans ekseninde oluşan 3 boyutlu görünümünü veren yersel dalgacık spektrumu ortaya çıkarılmış olur. Farklı ölçeklerdeki dalgacık fonksiyonlarının tüm zaman boyunca işaretle çarpımı sonucunda elde edilen katsayılar, boyutu ‘zaman $\times$ ölçek’ kadar olan bir matris oluşturur. Bu matris ise zaman-ölçek eksenlerinde bir görüntü oluşturur. Oluşan görüntü işarettaki farklı ölçek değerlerindeki spektral bileşenlerin ne zaman başlayıp ne zaman bittiği bilgisinin yanında spektral bileşenin işaret ile olan ilişkisinin kuvvetini de verir (Küçük, 2004).

3.4.1.2 Ayırık dalgacık dönüşümü

Dalgacık katsayılarının ölçek degerinde hesaplanması çok miktarda katsayının oluşmasına ve işlem yüküne neden olduğundan dolayı, katsayıların yalnızca seçilen ölçekler ve zaman diliminde hesaplanması bir çok avantaj sağlar. Bu sayede daha az sayıda ancak yine de işaretin frekans-ölçek bilgisinin zaman boyunca değişimini veren katsayılar elde edilmiş olur. Bu katsayılar bir zaman serisi meydana getirirler ve bu zaman serileri çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Bu çalışmada da çeşitli ölçek

değerlerinde elde edilen bileşenler gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması için kullanılacaktır.

Ayrık dalgacık dönüşümünde kullanılan ikili ölçek ve zaman adımıdır. Bu şekilde elde edilen her bir bileşen iki ve ikinin katları olacak şekilde ölçek değerlerine ait zaman serilerini ya da dalgacık katsayılarını verirler. Ayrık dalgacık dönüşümü için kullanılan dalgacık fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

$$\psi_{m,n}\left(\frac{t-\tau}{s}\right) = s_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t-n\tau_0 s_0}{s_0^m}\right) \quad (3.34)$$

burada m ve n tamsayı olarak dalgacığın sırası ile ölçek ve zaman eksenindeki öteleme parametreleridir. S_0 sabit bir öteleme adımını ifade eder ve bu çalışmada 2 olarak alınmıştır. τ_0 zaman eksenindeki öteleme aralığı değerini verir ve değeri 1 olarak alınmıştır. Bu değerler literatürde en çok kullanılan değerlerine göre alınmıştır. İkinin katları kullanılarak oluşturulan dalgacık fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

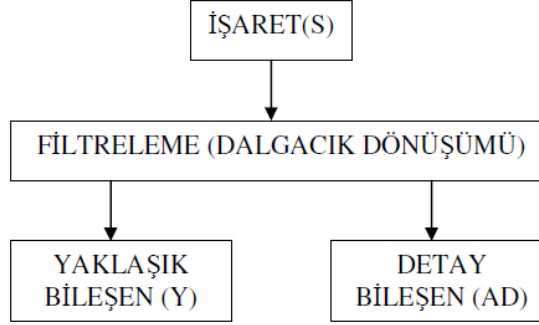
$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (3.35)$$

Bir i ayrık adımına sahip $x(t)$ zaman serisi için ayrık dalgacık dönüşümü aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

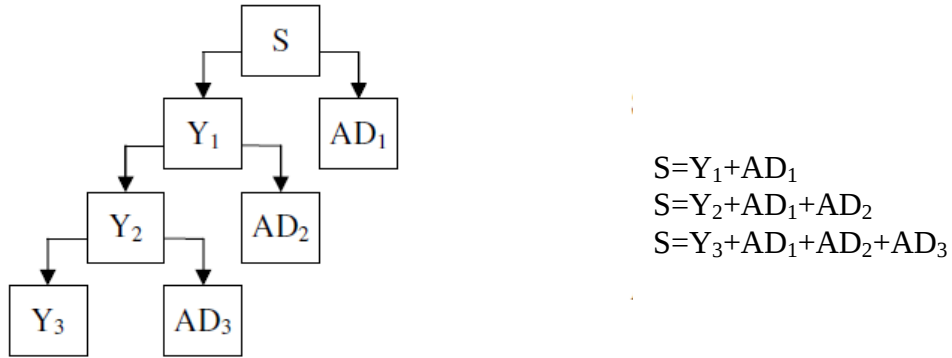
$$W_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \psi(2^{-m}i - n) \quad (3.36)$$

burada $W_{m,n}$, $s=2^m$ ölçek ve $\tau=2^m n$ zaman değerlerine sahip dalgacık dönüşümü katsayılarıdır. Denklemden $x_i, i=1, \dots, N-1$; sonlu değerlere sahip bir zaman serisi ve $N, N=2M$ şeklinde ifade edilen ikinin katı bir tamsayıdır. $1 < m < M$ olmak üzere $2m$ ölçeğinde, $m=M$ olduğu en geniş ölçekte, tüm zaman serisini kaplayacak yalnızca bir tane dalgacık gerekir. Bir sonraki ölçekte ise $(2M-1)$ iki adet dalgacık tüm zaman aralığını kapsar ve iki adet katsayı üretilmiş olur. Bu işleme $m=1$ 'e kadar devam edilir. Bu işlemlerden sonra boyutu $N=2M$ olan bir ayrık zaman serisini ifade edecek toplam katsayı sayısı $1+2+4+\dots+2M-1$ adettir. Böylece ayrık dalgacık dönüşümü

bize farklı zaman ve ölçeklerdeki bir zaman serisinin değişimi hakkında bilgi sağlar. Ayırık dalgacık dönüşümünün bu şekli ile her seferinde veri sayısı yarı oranda azalmaktadır. Ayırık dalgacık dönüşümünün çok çözünürlüklü analiz (multiresolution analysis, ÇÇA) adlı başka bir şekli daha vardır. Mallat (1989) tarafından önerilen ADD' nin genel çalışma prensibi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Mallat tarafından önerilen ADD' nin genel çalışma prensibi



Şekil 3.13 : İşaretin ADD ile bileşenlerine ayrılıp tekrar oluşturulması (S, orijinal işaret; Y, yaklaşık bileşen; AD, Detay bileşen)

edilmesine imkan tanımaktadır. Elde edilen tüm detay bileşenleri ve yaklaşık bileşenleri toplanırsa orijinal veriye dönülmüş olur.

İşaretin frekans bileşenlerine ayrılması, yüksek geçirir ve alçak geçirir filtreleme işlemi ile sağlanır. $x(q)$ orijinal işaret, $g(q)$ yüksek geçirir ve $h(q)$ alçak geçirir filtrelerden geçirilerek bileşenlerine ayrıştırılmış olur. Burada k filtre seviyesidir.

$$y_{yüksek}(k) = \sum_n x(q)g(2k - q) \quad (3.37)$$

$$y_{alçak}(k) = \sum_n x(q)h(2k - q) \quad (3.38)$$

Detay bileşenlerinin her birisi ayrı bir zaman serisi olup ait olduğu ölçekte orijinal seri hakkında önemli bilgiler içerir. Bu sayede orijinal serinin yapısının gizli özellikleri, detay bileşenler üzerinden incelenebilir. Detay bileşenlerinin bazıları orijinal serinin özelliklerinin büyük kısmını barındırabilir. Bu çalışmada dalga verilerinin detay bileşenleri ya da periyodik bileşenleri çıkarılmış ve bunların hangilerinin yansıma üzerine etkin olduğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca orijinal dalga verisinin kendi detay bileşenleri içerisinde de etkili olanlar bulunarak dalga serisi tahmini için kullanılmıştır. Bu sayede verilerin fiziksel yapısı periyodik ölçekte bir nevi ortaya konmuştur.

3.4.2 Dalgacık ile fourier arasındaki ilişki

Fourier analizi, bir sinyali farklı frekanslardaki bileşenlerine ayırırken, dalgacık analizi işlemi farklı ölçeklerde gerçekleştirmektedir. Amaç sinyalin içerisindeki gizli periyodikliğin belirlenmesi olduğundan, bu durumda ölçek ile frekans arasında bir ilişki kurmak gerekir. Bu ilişki $s=1/f$ dir. Frekansla ölçek arasında ters orantı olmakla birlikte, Fourier periyodu dalgacık ölçeğine eşit değil, denktir. Yani ana dalgacığın tipi değiştiğinde periyotla ölçek arasındaki oran da değişir. Örneğin Morlet dalgacığının ölçeği Fourier periyoduna hemen hemen eşitken, Meksika şapkasında ölçek Fourier periyodunun 1/4 katıdır (Torrence ve Compo, 1998). Bu nedenle analiz işleminden önce ölçek-periyot ilişkisi iyi bilinmelidir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında frekans analizinde kullanılacak verilerin elde edilmesi için düzensiz dalga üretici kanalda çalışmalar yapılmıştır ve dalga yüksekliği değerleri elde edildikten sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Düzensiz dalga üretici kanalın boyutları 1m × 22m × 1m (en, boy, yükseklik) dir. Kanalın fotoğrafı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Düzensiz dalga üretici kanal

4.1 Düzensiz Dalga Üretici Sistem

Düzensiz dalga kanalında oluşturulacak dalgalar mafsallı tipteki dalga paleti ile sağlanacaktır. Buradaki dalga paleti, üst taraftan bağlanmış bir hidrolik piston (Şekil 4.2) ve hidrolik sisteme (Şekil 4.3) bağlıdır.



Şekil 4.2 : Hidrolik Piston



Şekil 4.3 : Hidrolik Besleme Sistemi

İstenilen türdeki düzensiz dalgalar, seçilen bir dalga spektrumundan elde edilen sinyallerin servo sisteme gönderilmesi ile elde edilirler. Bilgisayarda dijital olarak bulunan sinyaller analog hale gelebilmesi için D/A dönüştürücü ile sisteme gönderilir. Düzenegi yönlendiren sistem Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Düzensiz Dalga Düzenliğini Yönlendiren Sistem

Dalga kayıtları için laboratuvarda kullanılan dalga kaydedici yardımıyla dijital kayıt değerleri volt olarak elde edilerek, kalibrasyon değerlerine göre anlamlı dalga karakteristiklerine dönüştürülecektir.

Üretilcek düzensiz dalgalar için bir matematik spektrum modelinin belirlenmesi gerekecektir. Bu sistemde Pierson-Moskowitz dalga spektrumu kullanılacaktır.

4.2 Dalga Sinyallerinin Pistona Gönderilmesi

Pierson-Moskowitz spektrumu kullanılarak elde edilecek dalga sinyalleri, sıfırdan geçme kuralına göre anlamlı dalga değerlerine çevrilerek hedef dalga kayıtları üretilcektir. Üretilen dalga kayıtlarının düzensiz dalga kanalına uygulanması için bu değerlerin piston deplasmanı olarak tekrar düzenlenmesi gerekir. Mafsallı tip piston için Biesel ve Suquet (1951) tarafından verilen algoritma aşağıda anlatılmıştır.

$$F(f, h) = \frac{H}{2.e} = 4. \frac{\sinh\left(\frac{2.\pi.h}{L}\right)}{\frac{2.\pi.h}{L}} \cdot \frac{1 - \cosh\left(\frac{2.\pi.h}{L}\right) + \frac{2.\pi.h}{L} \cdot \sinh\left(\frac{2.\pi.h}{L}\right)}{\frac{4.\pi.h}{L} + \sinh\left(\frac{4.\pi.h}{L}\right)} \quad (4.1)$$

Burada,

$F(f, h)$; Dönüşüm fonksiyonu,

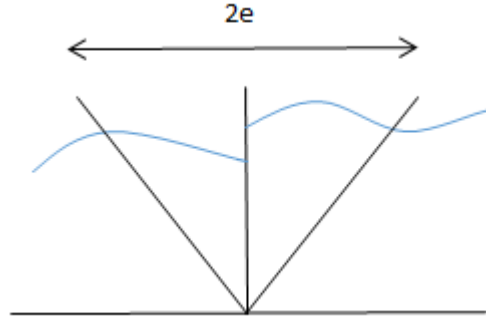
h ; Kanal su derinliği,

H ; Dalga yüksekliği,

L ; Dalga boyu,

$2e$; Dalga yüksekliğine karşılık gelen toplam deplasmandır.

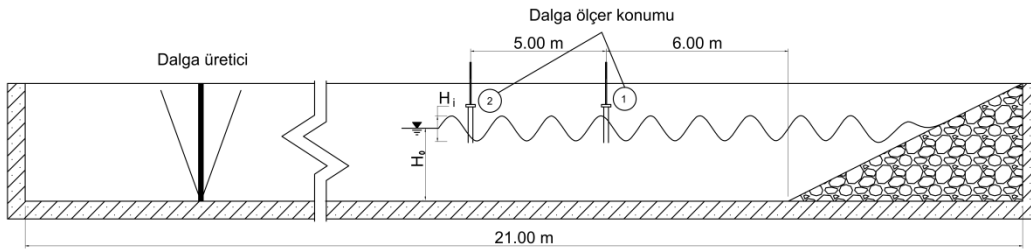
Düzensiz dalga serisi, yukarıda verilen algoritma yardımı ile her farklı dalga yüksekliği ve periyoduna sahip dalga için piston hareketi zamana bağlı olarak konumlandırılarak kanala uygulanacaktır.



Şekil 4.5 : Mafsallı Tip Piston Aleti

4.3 Düzensiz Dalga Üretici Kanalda Dalga Yüksekliği Ölçümleri

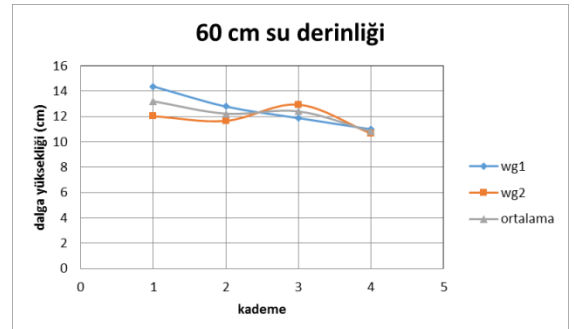
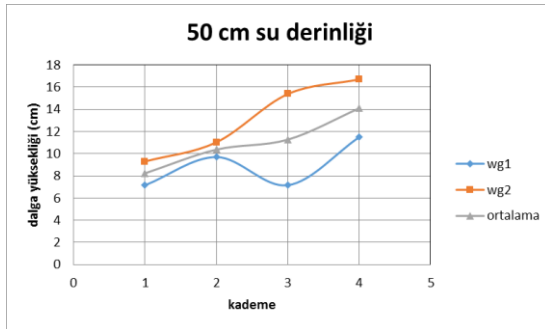
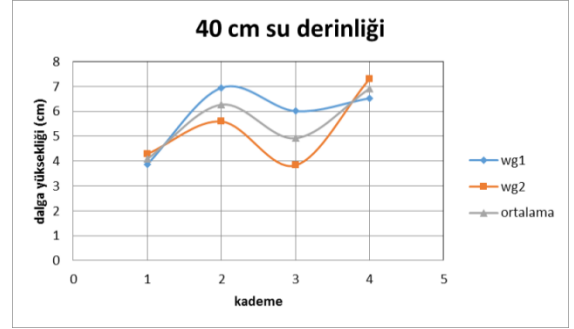
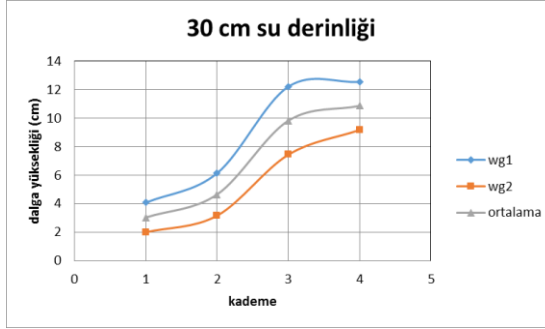
Düzensiz kanalda belirgin dalga yüksekliği ve periyotları hesaplanarak, sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Düzensiz kanalda, 1. ve 2. dalga ölçerlerin yapıdan mesafesi sırasıyla 2m ve 4m dir (Şekil 4.6). 1. ve 2. dalga ölçerler, Wg1 ve Wg2 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Dalga ölçerlerin konumu (düzensiz dalga üretici kanal)

Çizelge 4.1 : Düzensiz dalga üretici kanalda ölçülen dalga yüksekliği ve periyot

Derinlik 30 cm					Derinlik 40 cm				
Dalga serisi	Belirgin dalga yüksekliği (cm)			Peryot	Dalga serisi	Belirgin dalga yüksekliği (cm)			Peryot
	wg1	wg2	Ortalama			wg1	wg2	Ortalama	
1	4.07	1.99	3.03	1.68	1	3.88	4.29	4.09	1.76
2	6.14	3.16	4.65	1.28	2	6.95	5.59	6.27	1.26
3	12.22	7.44	9.83	1.05	3	6.01	3.83	4.92	1.07
4	12.55	9.18	10.87	0.84	4	6.53	7.31	6.92	0.86
Derinlik 50 cm					Derinlik 60 cm				
Dalga serisi	Belirgin dalga yüksekliği (cm)			Peryot	Dalga serisi	Belirgin dalga yüksekliği (cm)			Peryot
	wg1	wg2	Ortalama			wg1	wg2	Ortalama	
1	7.15	9.3	8.23	2.01	1	14.38	12.03	13.21	2.1
2	9.7	11.03	10.37	1.31	2	12.79	11.66	12.23	1.26
3	7.16	15.38	11.27	1.05	3	11.88	12.94	12.41	1.06
4	11.5	16.7	14.1	0.86	4	10.99	10.66	10.82	0.89



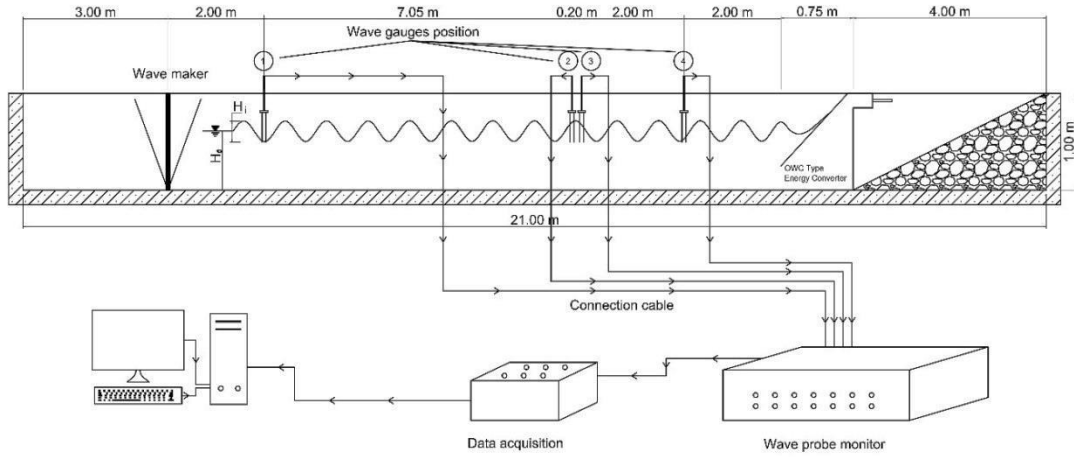
Şekil 4.7 : Düzensiz dalga üretici kanalda ölçülen dalga yüksekliği ve periyot

Modellemeler labratuvarımızda düzensiz dalga üretici kanalında yapılmıştır. Çünkü bu kanalda hem düzenli ve hemde düzensiz dalga üretilmektedir. Kullanılan dalga serileri düzenli ve düzensiz olarak ikiye ayrılmıştır: 3 düzenli dalga serisi ve 3 düzensiz dalga serisi kullanılmıştır. Bu deneylerde 4 temel değişken dikkate alınmıştır ki bunlar; sırasıyla dalgakıranın eğimi, belirgin dalga yüksekliği (H_i), dalga periyodu (T) ve su derinliği (H_0) dir. Deneyimizde dalgakıranın eğimi (1:4), belirgin

dalga yüksekliği aralığı 1-30 cm, periyot aralığı 0.5-2.5 sn ve su derinliği aralığı 30-60 cm dir.

Dalga yüksekliği, dalga monitörü, veri toplama cihazı (data acquisition) ve dalga ölçerler (wave gage) vasıtası ile ölçülmüştür. Deneylerde 4 dalga ölçer kullanılmıştır ve dalga yansıması, fourier, walsh ve dalgacık yöntemleri ile hesaplanmıştır.

4 dalga ölçeri kullanarak gelen ve yansıyan dalga zaman serisi elde etmek mümkündür. Dalga kanalının çizimi (dalga ölçer ve diğer cihazların yerleri) Şekil 4.8'de gösterilmiştir. 1. dalga ölçer oluşturulan dalga özelliklerini kontrol etmek için kullanılmıştır, 2. ve 3. dalga ölçer yansıma analizini hesaplamak için ve en son yani 4. dalga ölçer ise sadece yapının önünde dalga yüksekliğini ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.8 : Dalga kanalı

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

5.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada elde edilen tahmin sonuçları ile orijinal dalga verileri arasında karşılaştırma kriteri olarak belirlilik katsayısı (R^2), hataların ortalama karekökü (RMSE), dağılım indeksi (SI) ve Coefficient of efficiency (CE) esas alınmıştır.

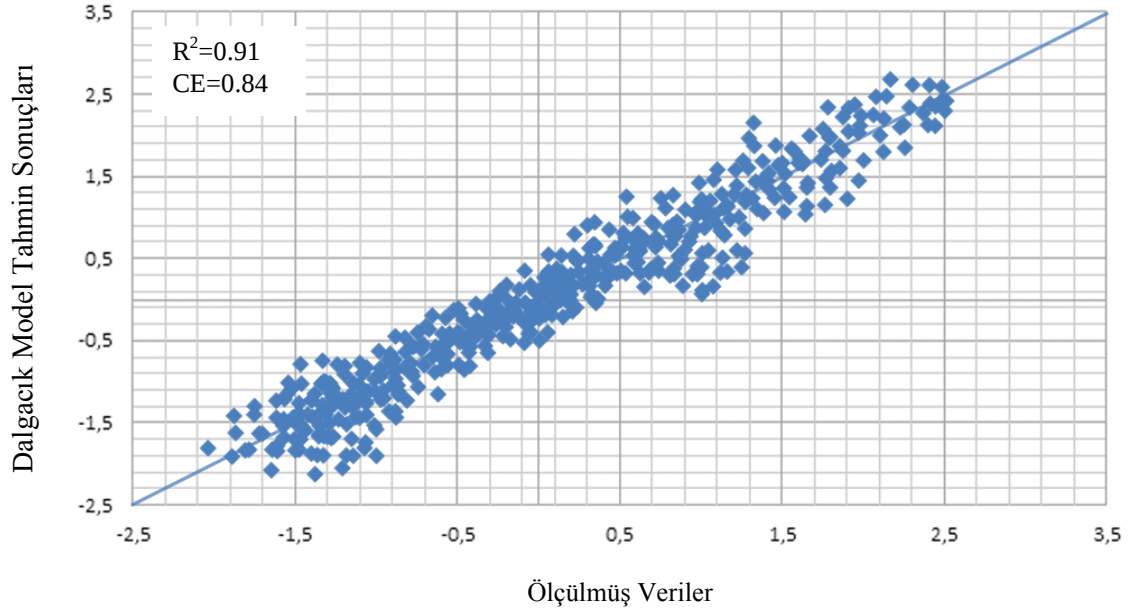
R^2 , belirlilik katsayısı (determinasyon katsayısı) olarak adlandırılır. Belirlilik katsayısı, iki değişken arasında anlamlı bir ilişki olup olmadığına karar vermek için yapılan ve iki değişken arasındaki doğrusal bağımlılığın bir ölçüsü olan korelasyon katsayısının karesini göstermektedir. RMSE, genellikle model tarafından tahmin edilen ve gözlemlenen değerler arasındaki farkı ölçmek için kullanılır. Hataların kareleri toplamı ortalamasının kareköküdür. Dağılım indeksi, standart sapmanın ortalama değere bölünmesi ile bulunur. Diğer bir ifade ile RMSE'un ortalamaya oranıdır. CE, model sonuçlarının doğruluğunu kontrol etmek amacı ile, hataların ortalamasının gözlemin varyansına oranının 1'den çıkartılması ile bulunur.

5.2 Metodların Sonuçları ve Yorumlar

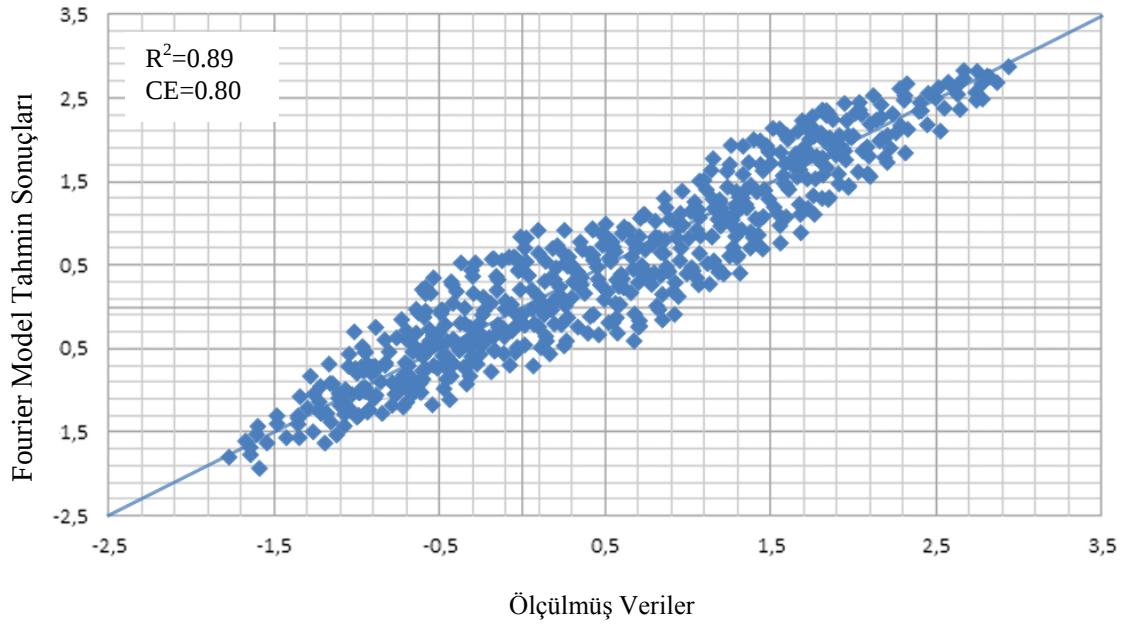
Düzenli ve düzensiz dalga serisi tahminlerinde R^2 , RMSE, SI ve CE değerlerini göz önünde bulundurduğumuz zaman, bu tez çalışmasında uygulanan modeller arasında Dalgacık modelinin en uygun tahmin yaptığını görebiliriz. 1 numaralı dalga serisi için Dalgacık modelinin tahmin sonuçlarının istatistiksel parametreleri olan $R^2=0,91$ olarak elde edilmiş olup, gözlem değerine çok yakın bir değer tahmin etmiştir. Genel olarak Dalgacık modelinin tahmin sonuçları düzenli ve düzensiz dalgalarda daha iyi sonuçlar verirken, dalgacık modelinden sonra fourier modeli ile düzenli dalgalarda, Walsh modeli ile de düzensiz dalgalarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Tahmin edilen ve ölçülen dalga yüksekliği değerleri arasındaki korelasyon analizi Şekil 5.1-5.3 arasında gösterilmiştir. Diğer dalga serileri için elde edilen grafikler Ek-A'da verilmiştir. Gösterimde iki değişken birbirine korelasyon ile ilişkili olup her iki değişkenin de normal dağılıma uyduğu varsayımlarının gerçeğe uygun olduğu kabul edilebilir.

Çizelge 5.1 : Dalga serileri için elde edilen R^2 , RMSE, SI ve CE değerleri

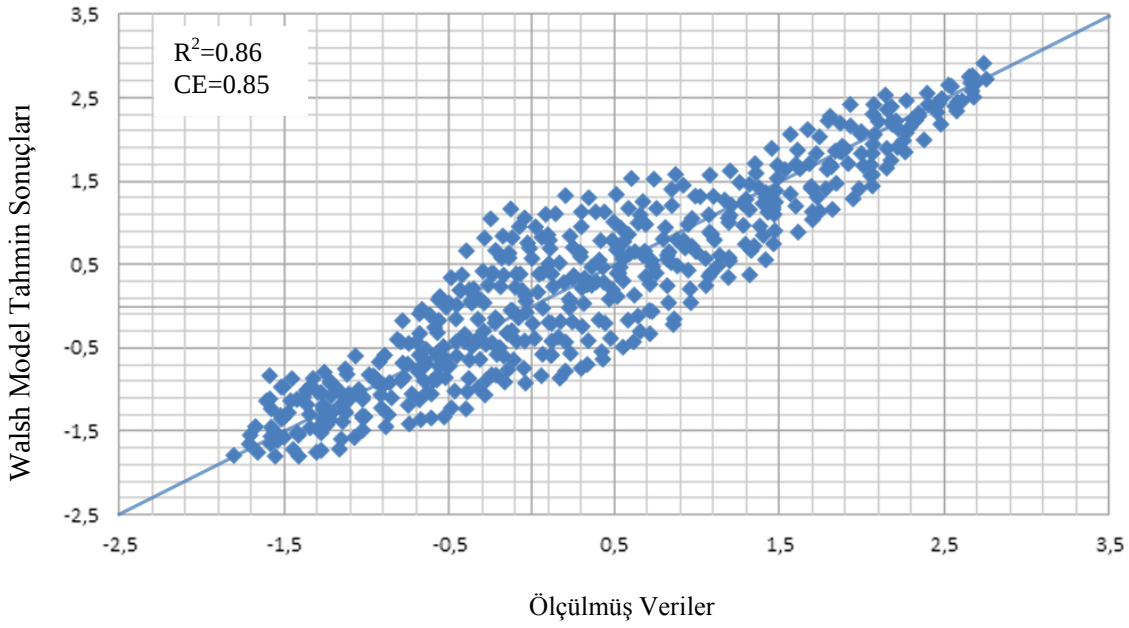
Dalga Serisi	R^2	RMSE	SI	CE
1Nolu düzenli dalga (Dalgacık Analizi)	0,91	0.0372	0.12	0.84
1Nolu düzenli dalga (Fourier Analizi)	0,89	0.0463	0.063	0.80
1Nolu düzenli dalga (Walsh Analizi)	0,86	0.0240	0.042	0.85
2Nolu düzenli dalga (Dalgacık Analizi)	0,89	0.0682	0.014	0.85
2Nolu düzenli dalga (Fourier Analizi)	0,87	0.0681	0.095	0.83
2Nolu düzenli dalga (Walsh Analizi)	0,85	0.0373	0,076	0.77
3Nolu düzenli dalga (Dalgacık Analizi)	0,90	0.0568	0.015	0.84
3Nolu düzenli dalga (Fourier Analizi)	0,87	0.0427	0.057	0.80
3Nolu düzenli dalga (Walsh Analizi)	0,86	0.0636	0.049	0.85
1Nolu düzensiz dalga (Dalgacık Analizi)	0,85	0.1472	0.027	0.84
1Nolu düzensiz dalga (Fourier Analizi)	0,81	0.0794	0.014	0.79
1Nolu düzensiz dalga (Walsh Analizi)	0,83	0.0868	0.011	0.78
2Nolu düzensiz dalga (Dalgacık Analizi)	0,85	0.0752	0.071	0.84
2Nolu düzensiz dalga (Fourier Analizi)	0,82	0.0843	0.055	0.80
2Nolu düzensiz dalga (Walsh Analizi)	0,83	0.0850	0.042	0.75
3Nolu düzensiz dalga (Dalgacık Analizi)	0,86	0.0856	0.028	0.85
3Nolu düzensiz dalga (Fourier Analizi)	0,83	0.0875	0.035	0.78
3Nolu düzensiz dalga (Walsh Analizi)	0,85	0.0841	0.042	0.77



Şekil 5.1 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



Şekil 5.2 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



Şekil 5.3 : 1 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)

Temel frekans analizi olan Fourier analizinin sinyalin ne tür bir spektral bileşenlere sahip olduğunu belirlemesi açısından yararlıdır. Fourier analizinde seriler için elde edilen katsayıların kullanıldığı dalganın genel denklemini yazacak olursak,

$$\eta_I = a_I \cos(kx - \omega t + \varepsilon_I) \quad (5.1)$$

$$\eta_R = a_R \cos(kx + \omega t + \varepsilon_R) \quad (5.2)$$

Burada,

η_I = Gelen dalganın yüzey profili değişimi

η_R = Yansıyan dalganın yüzey profili değişimi

a_I = Gelen dalganın genliği

a_R = Yansıyan dalganın genliği

k = Dalga sayısı

ω = Açısal frekans

ε_I = Gelen dalganın faz açısı

ε_R = Yansıyan dalganın faz açısı

Kompozit dalga için ölçülen dalga profilleri,

$$\eta_1 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_1} = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (5.3)$$

$$\eta_2 = (\eta_I + \eta_R)_{x=x_2} = A_2 \cos \omega t + B_2 \sin \omega t \quad (5.4)$$

Buradan,

$$A_I = a_I \cos \phi_I + a_R \cos \phi_R \quad (5.5)$$

$$B_I = a_I \sin \phi_I - a_R \sin \phi_R \quad (5.6)$$

$$A_2 = a_I \cos(k\Delta l + \phi_I) + a_R \cos(k\Delta l + \phi_R) \quad (5.7)$$

$$B_2 = a_I \sin(k\Delta l + \phi_I) - a_R \sin(k\Delta l + \phi_R) \quad (5.8)$$

$$\phi_I = kx_I + \varepsilon_I \quad (5.9)$$

$$\phi_R = kx_I + \varepsilon_R \quad (5.10)$$

Burada Fourier analizi kullanılarak A_1 , A_2 , B_1 , ve B_2 genlik değerleri elde edilmiştir. Tüm analizler 2, 3 ve 4 prob olduğu durumlarda elde edilen dalga serileri için tekrarlanmıştır.

Fourier analizi ile elde edilen sonuçlar Goda&Suzuki (1976) çalışması ile elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yansıma katsayılarına bağlı olarak dalga yüksekliğinin ölçüm değerleri ve tahmin değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de korelasyon analizi sonucunda elde edilen belirlilik katsayı değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Yansıma katsayılarına göre korelasyon analizi ile elde edilen belirlilik katsayı değerleri (Düzenli Dalga)

	Goda&Suzuki	Fourier Analizi	Walsh Analizi	Wavelet Analizi
K_r	0.82	0.82	0.82	0.82
CE	0.81	0.81	0.78	0.87
RMSE	0.0343	0.0321	0.0240	0.0372
R²	0.87	0.87	0.85	0.91

Çizelge 5.3 : Yansıma katsayılarına göre korelasyon analizi ile elde edilen belirlilik katsayı değerleri (Düzensiz Dalga)

	Goda&Suzuki	Fourier Analizi	Walsh Analizi	Wavelet Analizi
K_r	0.55	0.55	0.55	0.55
CE	0.76	0.73	0.80	0.82
MSE	0.0823	0.0819	0.0891	0.0904
R²	0.82	0.79	0.84	0.87

Buna göre en iyi sonucun Wavelet analizi ile elde edildiği görülmektedir. Goda&Suzuki, Fourier analizi ve Walsh analizi ile elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmada uygulanan bir diğer analiz yöntemi olarak, gelen ve yansıyan dalgaların ayrıştırılması için Walsh fonksiyonları kullanılmıştır. Bu yöntem, mevcut yöntemlerle karşılaştırıldığında belli şartlar kabul edildiğinde; izin verilen birden fazla açı ve verilen bir aralık içinde fourier analizine göre daha kolay ve hızlıdır. Hesaplamaları lineer cebir denklemleri içerir. Walsh fonksiyonları ile N=4,8,16,32 ve 64 alt aralıkları için çözümlemeler yapılmıştır. Walsh fonksiyonları ile N=16 alt aralık için yapılan çözüme göre, N=32 alt aralıkta, daha hassas, istenilen çözüme yakın bir sonuç elde edildiği görülmüştür ancak N= 64 alt aralığı için değişim olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle N=32 alt aralığı seçilmiştir. Walsh fonksiyonlarının alt aralık değerinin değişimine göre incelenen en hassas alt değeri referans alınarak bulunan çözümde denklem (5.11)'e göre hata hesabı yapıldığında hata = 0.0115 olarak bulunur. Bu değer N=16 alt aralıkta ve denklem (5.12) başlangıç aralıkları için elde edilir.

$$hata = \sqrt{\frac{(A_{1gerçek} - A_{1bulunan})^2 + (B_{1gerçek} - B_{1bulunan})^2 + \dots + (A_{ngerçek} - A_{nbulunan})^2 + (B_{ngerçek} - B_{nbulunan})^2}{n}} \quad (5.11)$$

$$0 < A_1, B_1 < \frac{1}{16} \quad \frac{1}{16} < A_2, B_2 < \frac{2}{16} \quad (5.12)$$

Fonksiyon, N=16 alt aralıkta ve farklı başlangıç aralıkları için incelenirse denklem (5.13) elde edilir ve burada hata = 0.0032 olarak bulunur.

$$0 < A_1, B_1 < \frac{1}{16} \quad \frac{1}{16} < A_2, B_2 < \frac{3}{16} \quad (5.13)$$

Aralıklar değiştirildiğinde hata yaklaşık dört kat kadar azalmıştır, Walsh fonksiyonlarının kullanımında başlangıç aralıklarının doğru belirlenmesi sonucu oldukça etkilemektedir. Yanlış aralıklar belirlendiği takdirde gerekli çözüm için sonuç yakınsamaz.

Fonksiyonu N=32 aralıkta incelersek, A_1, B_1, A_2 ve B_2 için başlangıç aralıkları belirlenirse denklem (5.14) elde edilir ve hata= 0,0013 olarak bulunur.

$$\frac{1}{32} < A_1, B_1 < \frac{2}{32} \quad \frac{3}{32} < A_2, B_2 < \frac{4}{32} \quad (5.14)$$

Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’ de Walsh fonksiyonları ile hesaplanan katsayı değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.4 : Düzenli ve düzensiz dalgaların walsh fonksiyonu için hesaplanan katsayı değerleri (gelen dalga)

Dalga Serileri (Gelen)	Walsh Fonksiyonları için katsayı değerleri
Düzenli 1 (N=16)	$A_1, B_1 = 0.043, A_2, B_2 = 0.052$
Düzenli 2 (N=16)	$A_1, B_1 = 0.052, A_2, B_2 = 0.064$
Düzenli 3 (N=16)	$A_1, B_1 = 0.048, A_2, B_2 = 0.049$
Düzensiz 1 (N=32)	$A_1, B_1 = 0.064, A_2, B_2 = 0.082$
Düzensiz 2 (N=32)	$A_1, B_1 = 0.057, A_2, B_2 = 0.077$
Düzensiz 3 (N=32)	$A_1, B_1 = 0.112, A_2, B_2 = 0.107$

Çizelge 5.5 : Düzenli ve düzensiz dalgaların walsh fonksiyonu için hesaplanan katsayı değerleri (yansıyan dalga)

Dalga Serileri (Yansıyan)	Walsh Fonksiyonları için katsayı değerleri
Düzenli 1(N=16)	$A_1, B_1 = 0.121, A_2, B_2 = 0.125$
Düzenli 2(N=16)	$A_1, B_1 = 0.118, A_2, B_2 = 0.135$
Düzenli 3(N=16)	$A_1, B_1 = 0.103, A_2, B_2 = 0.122$
Düzensiz 1(N=32)	$A_1, B_1 = 0.147, A_2, B_2 = 0.153$
Düzensiz 2(N=32)	$A_1, B_1 = 0.152, A_2, B_2 = 0.155$
Düzensiz 3(N=32)	$A_1, B_1 = 0.139, A_2, B_2 = 0.148$

Bu çalışmada gelen ve yansıyan dalgaları ayırtırmak amacıyla kullanılan bir diğer analiz yöntemi olan dalgacık analizinde, tüm dalga serileri ayrık dalgacık dönüşümü kullanılarak çeşitli seviyelerde periyodik bileşenlerine ayrılmıştır.

Dalgacık dönüşümü ile bileşenlere ayırma işleminde Mallat (1989) tarafından verilen algoritma yardımıyla orijinal veri (işaret) yaklaşık ve detay bileşenleri olarak adlandırılan çeşitli serilere ayrılmış olur ve bu serilerin üst üste toplanması ile orijinal veri tekrar elde edilir. Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de düzenli ve düzensiz dalga verilerinin ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ile elde edilen bileşenlerini göstermektedir. Tüm ayrık dalgacık (AD) bileşenleri aynı orijinal seri kadar uzunluğa sahip birer zaman serisi meydana getirmektedir. Burada AD1, 1. seviyedeki detay bileşenidir ve bize en yüksek frekanslı değişimleri vermektedir. AD 9 ise en düşük frekansa sahip detay bileşenidir. Orijinal zaman serisinin AD bileşenleri bize farklı çok yararlı bilgiler vermektedir. Her bir AD bileşeni ayrı bir zaman serisi olarak incelenebilir ve orijinal serinin farklı özellikleri belirlenebilir. Her bir ölçek seviyesinde zaman serilerinin istatistik incelemesi ile orijinal serinin gizli özellikleri ortaya çıkarılabilir. Her bir ölçek seviyesinin incelenmesi fiziksel olarak da önemli bilgiler verebilir.

Çizelge 5.6 : Düzenli ve düzensiz dalgaların ADD ile elde edilen bileşenleri (gelen dalga)

Dalga Serileri (Gelen)	Dalgacık Bileşeni
Düzenli 1	AD7+AD8
Düzenli 2	AD3+AD8
Düzenli 3	AD2+AD3+AD7
Düzensiz 1	AD2+AD3+AD7+AD8
Düzensiz 2	AD1+AD7+AD8+ AD9
Düzensiz 3	AD2+AD3+AD4+AD8

Çizelge 5.7 : Düzenli ve düzensiz dalgaların ADD ile elde edilen bileşenleri (Yansıyan dalga)

Dalga Serileri (Yansıyan)	Dalgacık Bileşeni
Düzenli 1	AD2+AD3+AD7+AD8
Düzenli 2	AD2+AD3+AD4+AD7
Düzenli 3	AD2+AD3+AD7+AD8+AD9
Düzensiz 1	AD1+AD2+AD3+AD4+AD7+ AD8
Düzensiz 2	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+ AD8
Düzensiz 3	AD2+AD3+AD4+AD5+AD6+AD7+AD8

Kullanılan 3 farklı frekans analizi yönteminin karşılaştırma sonuçları Ek A'da gösterilmektedir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak hâlihazırda var olan zaman-frekans analiz yöntemleri arasında ilişki kurulması ve iyileştirilmeleri amaçlanmıştır.

6. BULGULAR

- * Tez kapsamında uygulanan frekans analizleri içerisinde düzenli ve düzensiz dalga serileri için en iyi sonuç dalgacık modeli ile elde edilmiştir.
- * Her bir seri için dalga verilerinin AD bileşenleri içerisinde uygun olanlar seçilmiş ve bu uygun olan bileşenlerin aritmetik toplanmasıyla yeni toplanmış AD bileşenleri zaman serileri elde edilmiştir. Orjinal verilerle çalışmak yerine onların alt bileşenleri ile çalışmak dalga tahminine farklı bir bakış getirmiştir.
- * Periyodik bileşenler incelenerek, etkin bileşenler belirlenmiştir. Böylece fiziksel olarak etkin bileşenler ile çok daha isabetli tahminler yapılabilmektedir.
- * Dalgacık analizinin Fourier analizinden temel farkı, dalgacık bileşenleri hem frekansa hem de zamana bağlı olurken, standart Fourier Dönüşümü sadece frekansa bağlı olmaktadır. Sonuç olarak Wavelet analizinin amacı güçlü temel dalgacık fonksiyonları tanımlamak ve verimli hesaplama yöntemleri bulmaktır.
- * Düzenli dalgalarda Fourier analizi ile elde edilen sonuçların, düzensiz dalgalarda ise Walsh analizi ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu tesbit edilmiştir. Bunun nedeni Fourier analizinin ham veri sinyali sinüsoidal frekans olması sebebiyle düzenli dalgalara daha uygun yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

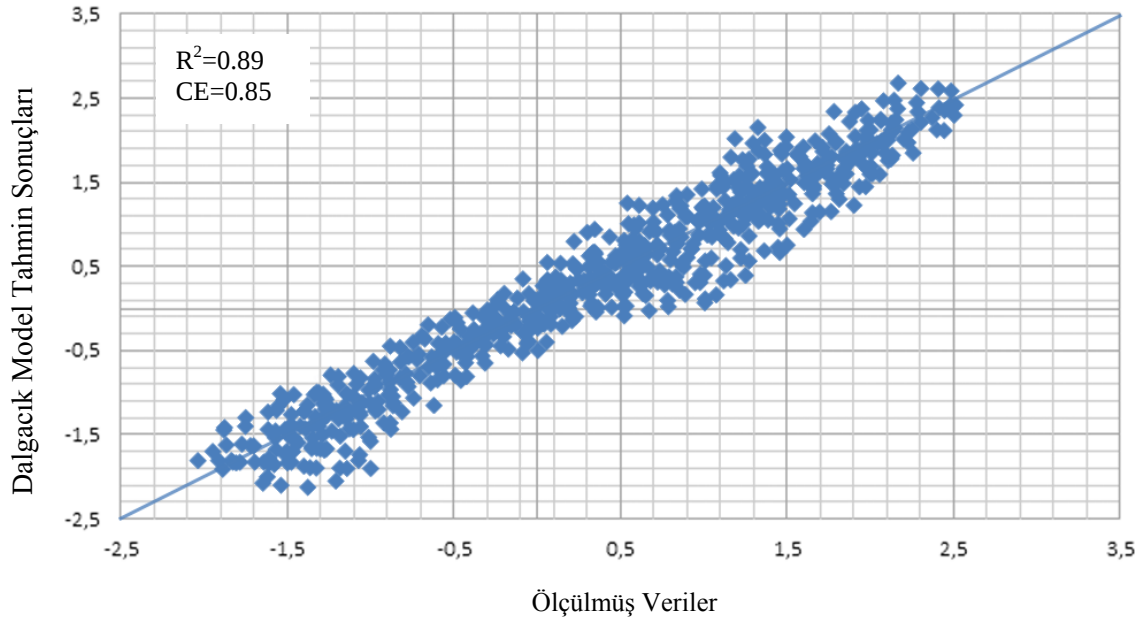
KAYNAKLAR

- Altunkaynak, A.**, (2014), Predicting water level fluctuations in Lake Michigan-Huron using Wavelet-Expert system methods, *Water Resource Management*, 28: 2293-2314
- Baldock, T.E., Simmonds, D.J.**, (1999). Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry. *Coastal Engineering* 38 (3), 167–176.
- Brossard, J., Hemon, A., Rivoalen, W.**, (2000) “Improved analysis of regular gravity waves and coefficient of reflection using one or two moving probes”, *Coastal Engrg.* 39, 193–212.
- Chang, H.K., Hsu, T.W.**, (2003). A two-point method for estimating wave reflection over a sloping beach. *Ocean Engineering* 30 (14), 1833–1847.
- Çevik, E.**, (2006), Kıyı Mühendisliğinde İstatiksel Yöntemler, Ders Notları, İstanbul
- Farge, M.**, (1992). Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics* 24, 395–457.
- Frigaard, P., Brorsen, M.**, (1995). A time-domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coastal Engineering* 24 (3–4), 205–215.
- Goda, Y.**, (1974), Estimation of wave statistics from spectral information, *Proc. Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis*, New Orleans, Vol. 1, pp.320-337.
- Goda, Y., Suzuki, Y.**, (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Proceeding of 15th International Conference on Coastal Engineering*. ASCE, Honolulu, Hawaii. pp. 828–865.
- Goda, Y.**, (1999) A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum. *Coastal Engineering Journal* 41 (1), 1–20.
- Hansen, J. B., Svendsen, I.A.**, (1974) Laboratory generation of waves of constant form, *Proc. 14th Coastal Engg. Conf.*, Copenhagen, pp.321-339.
- Hidy, G. M., Plate E.J.**, (1966) Wind action on water standing in a laboratory channel, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 26, pp.651-687.
- Isaacson, M.**, (1991) “Measurement of regular wave reflection”, *J. Waterway, Port, Coastal& Ocean Engrg.*, 117(6), 553–569.
- Kajima, R.**, (1969), Estimation of incident wave spectrum in the sea area influenced by reflection, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 12, J.S.C.E., 1969, pp.9-16.
- Kijewski, T., Kareem, A.**, (2003), Wavelet transforms for system identification in civil engineering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 18 (5), 339–355.
- Ma, Y.X., Dong, G.H., Ma, X.Z., Wang, G.**, (2010), A new method for separation of 2D incident and reflected waves by the Morlet wavelet transform. *Coastal Engineering* 57 (6), 597–603.

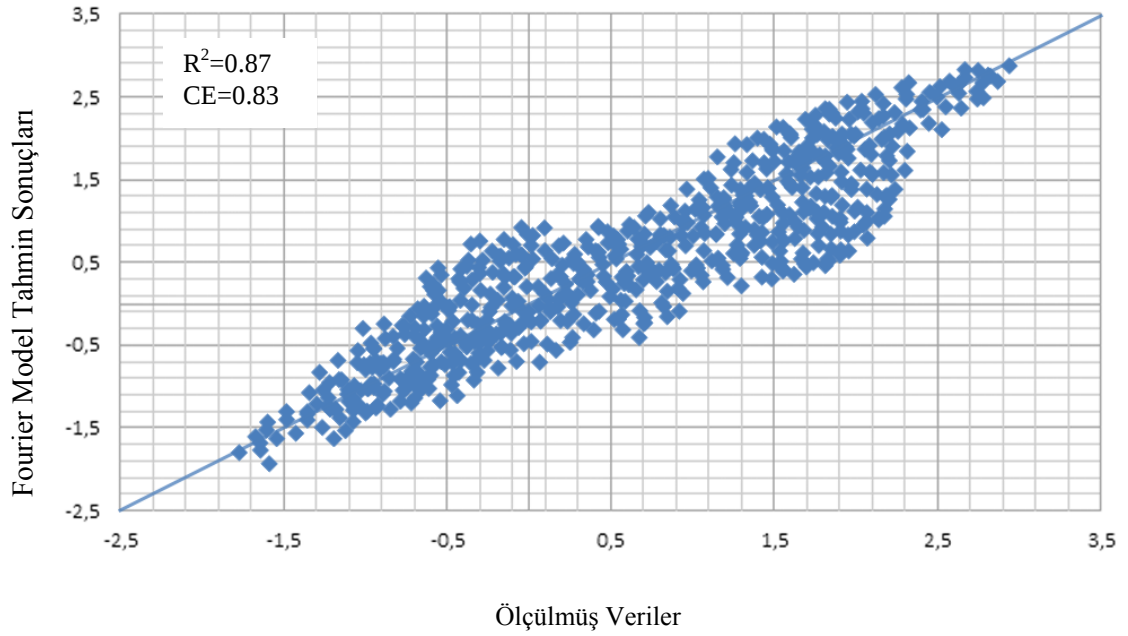
- Mansand, E., Funk, E.,** (1980), The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. Proceedings of 17th Interactional Conference on Coastal Engineering. ASCE, Sydney, Australia, pp. 154–172.
- Miner, N.E.,** (1998), An introduction to wavelet theory and analysis. Sandia Report, NM, October:1-25 p.
- Nallayarasu S., Hin Fatt, C., Shankar N.J.,** (1995), Estimation of incident and reflected waves in regular wave experiments, *Ocean Engrg.* 22(1), 77–86.
- Suh, K.D., Park, W.S., Park, B.S.,** (2001), Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Engineering* 43 (3–4), 149–159.
- Tadjbaksh, I., Keller, J.B.,** (1960), Standing surface waves of finite amplitudes, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 8, pp.442-451.
- Thornton, E.B. , Calhoun, R.J.,** (1972), Spectral resolution of breakwater reflected waves, *J. Waterway, Port, Coastal & Ocean Engrg.*, 98(4), 443–460.
- Torrence, C., Compo, G.P.,** (1998) A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (1), 61–78.
- Wang, S.K., Hsu, T.W., Weng, W.K., Ou, S.H.,** (2008), A three-point method for estimating wave reflection of obliquely incident waves over a sloping bottom. *Coastal Engineering* 55 (2), 125–138.
- Yan, B.F., Miyamoto, A., Bruhwiler, E.,** (2006), Wavelet transform-based modal parameter identification considering uncertainty. *Journal of Sound and Vibration* 291 (1–2), 285–301.
- Zelt, J.A., Skjelbreia, J.E.,** (1992), Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. Proceedings of 23rd International

EKLER

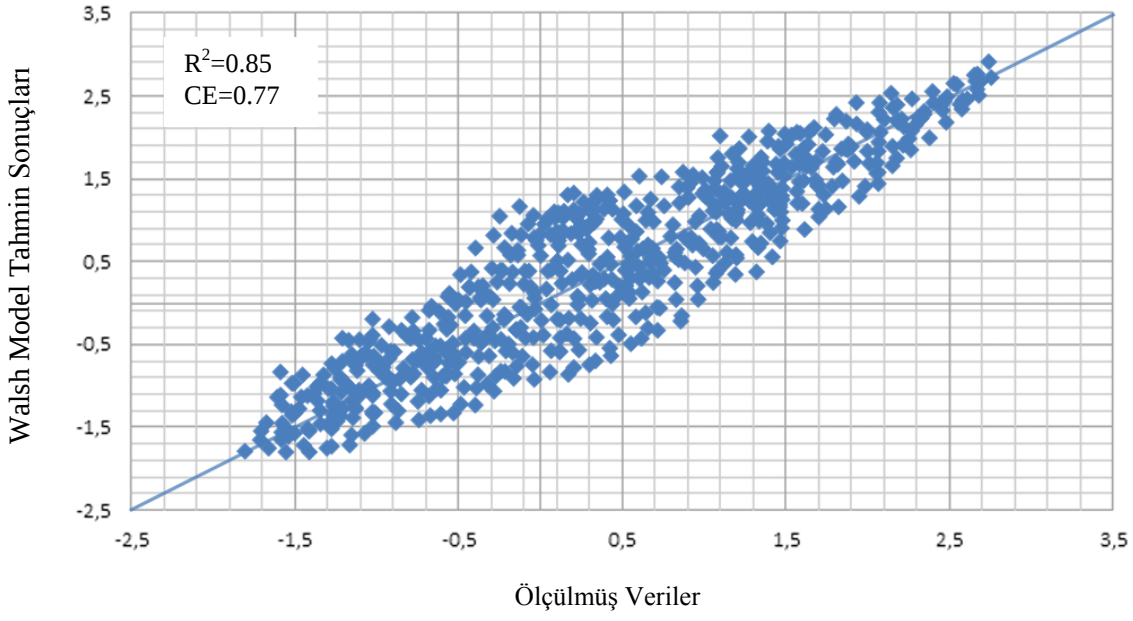
EK A: Kullanılan Yöntemlerin Sonuçları



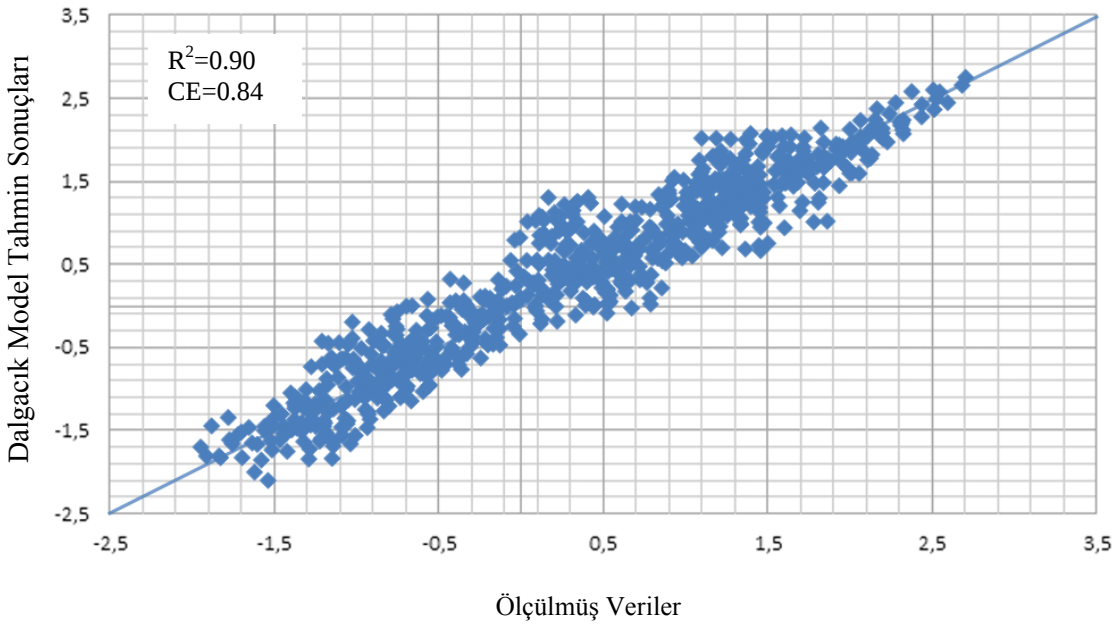
Şekil A.1 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



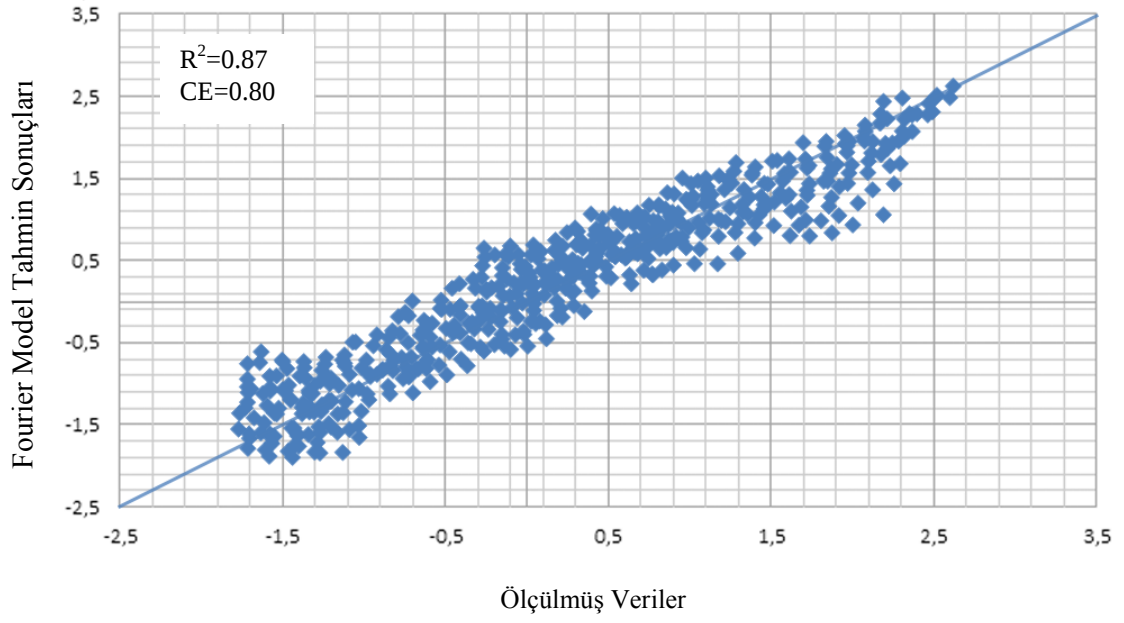
Şekil A.2 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



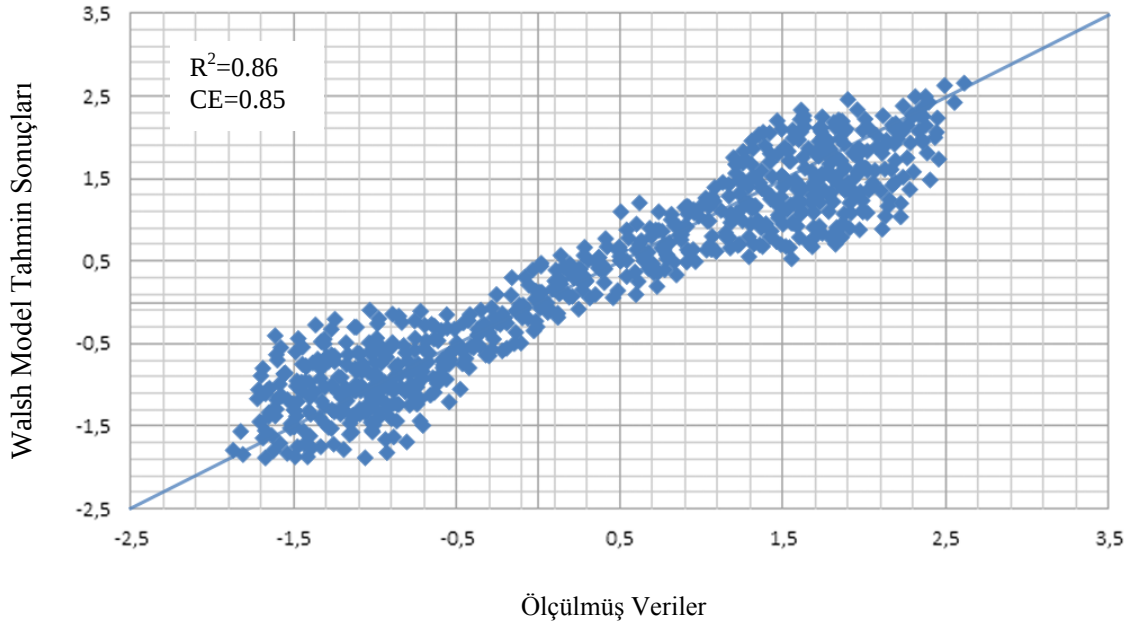
Şekil A.3 : 2 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)



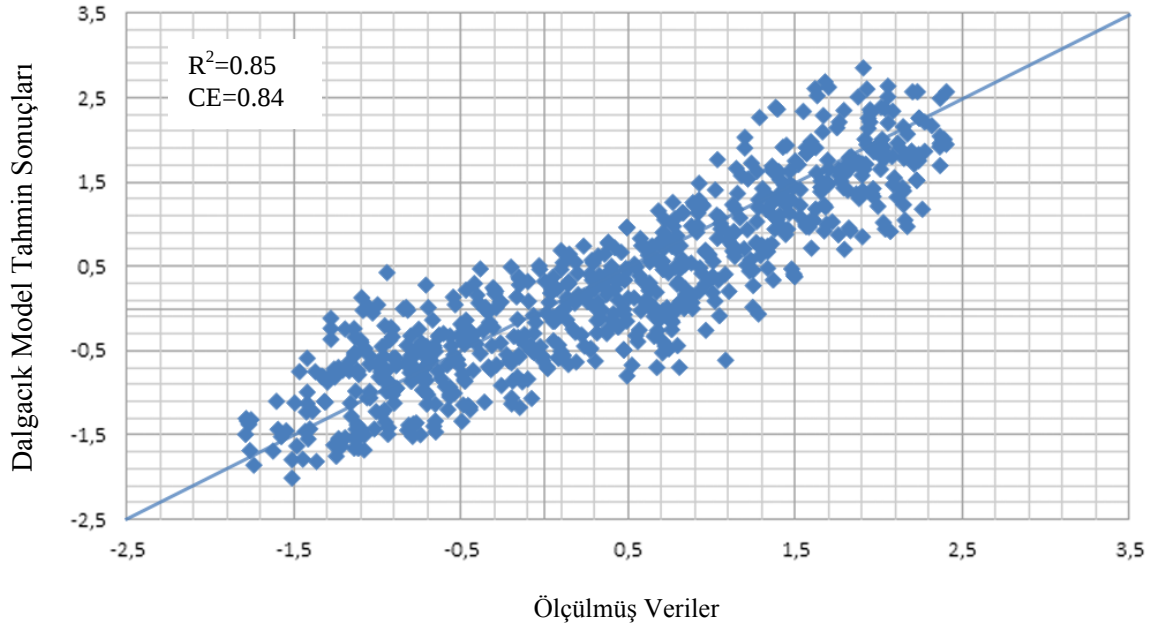
Şekil A.4 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



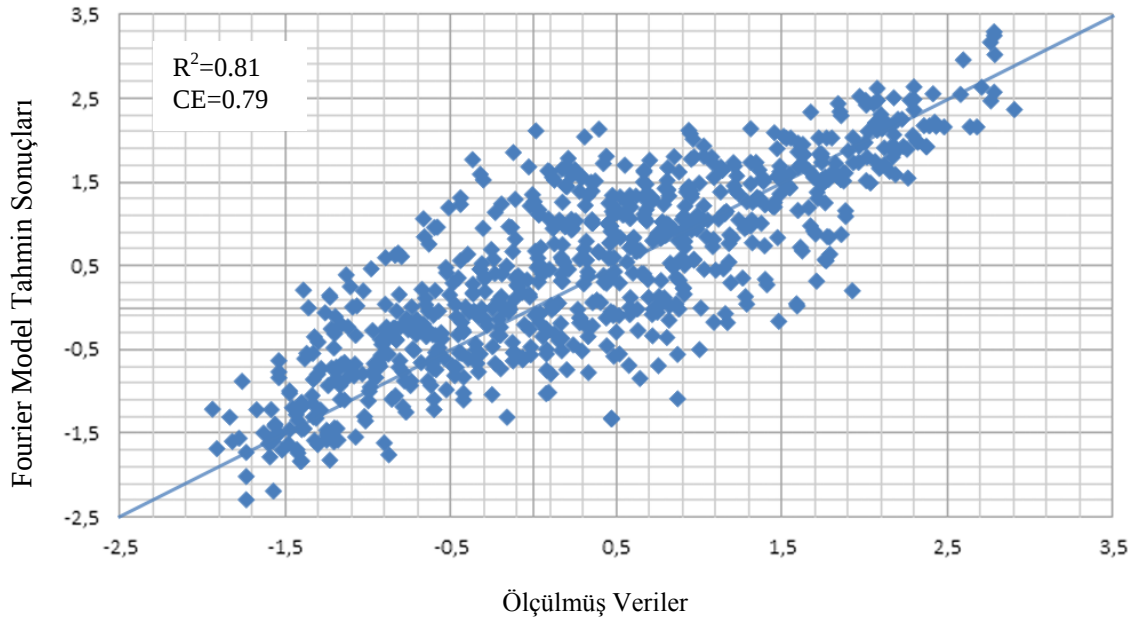
Şekil A.5 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



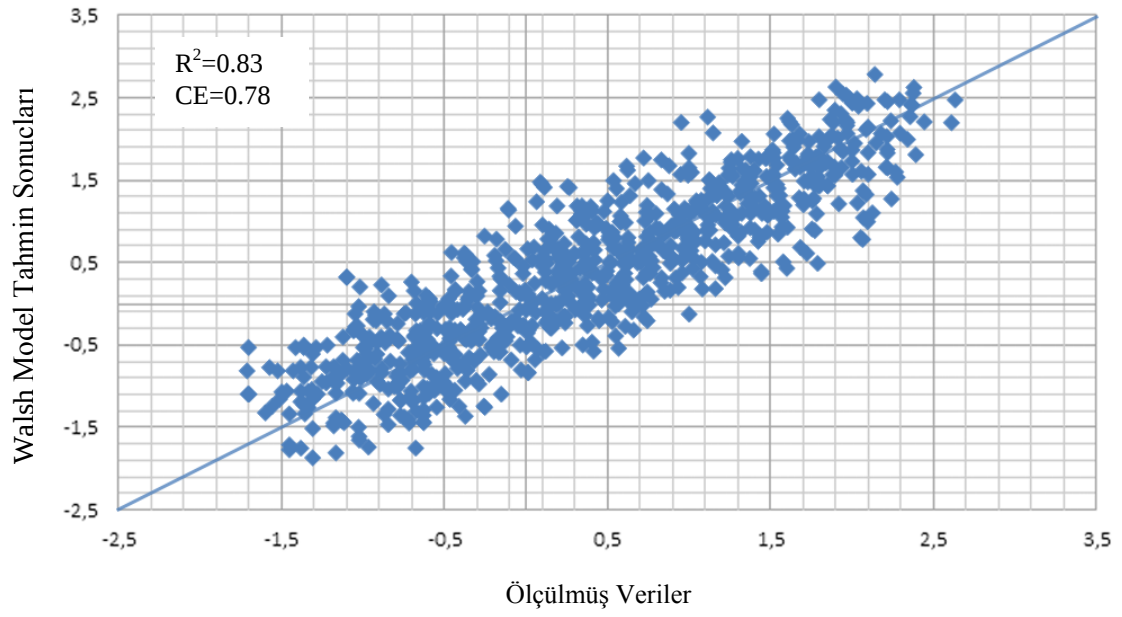
Şekil A.6 : 3 nolu düzenli dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)



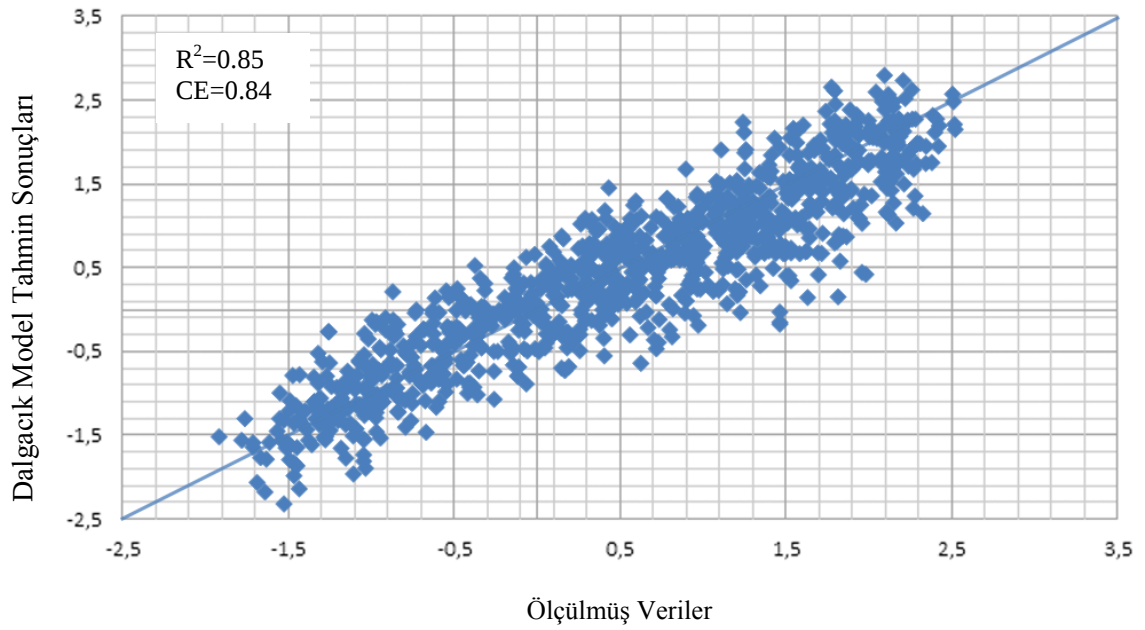
Şekil A.7 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



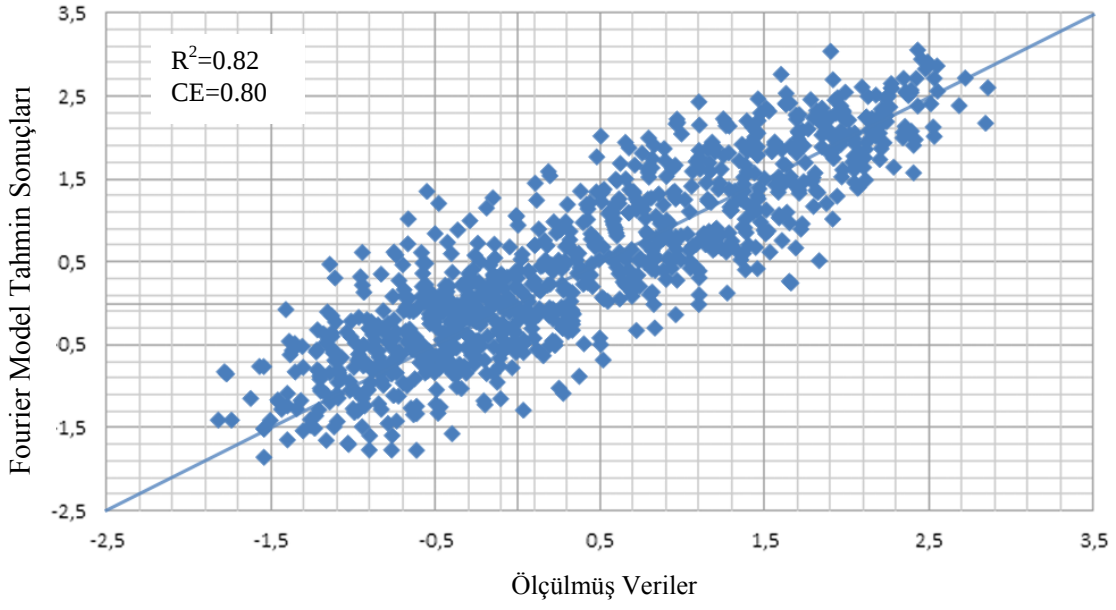
Şekil A.8 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



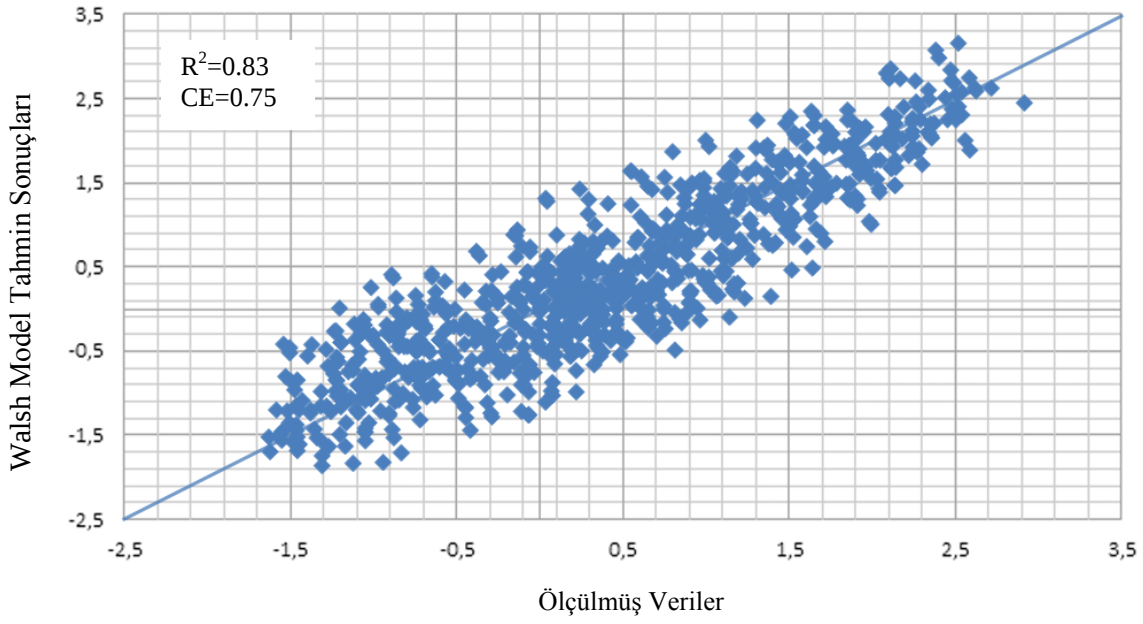
Şekil A.9 : 1 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)



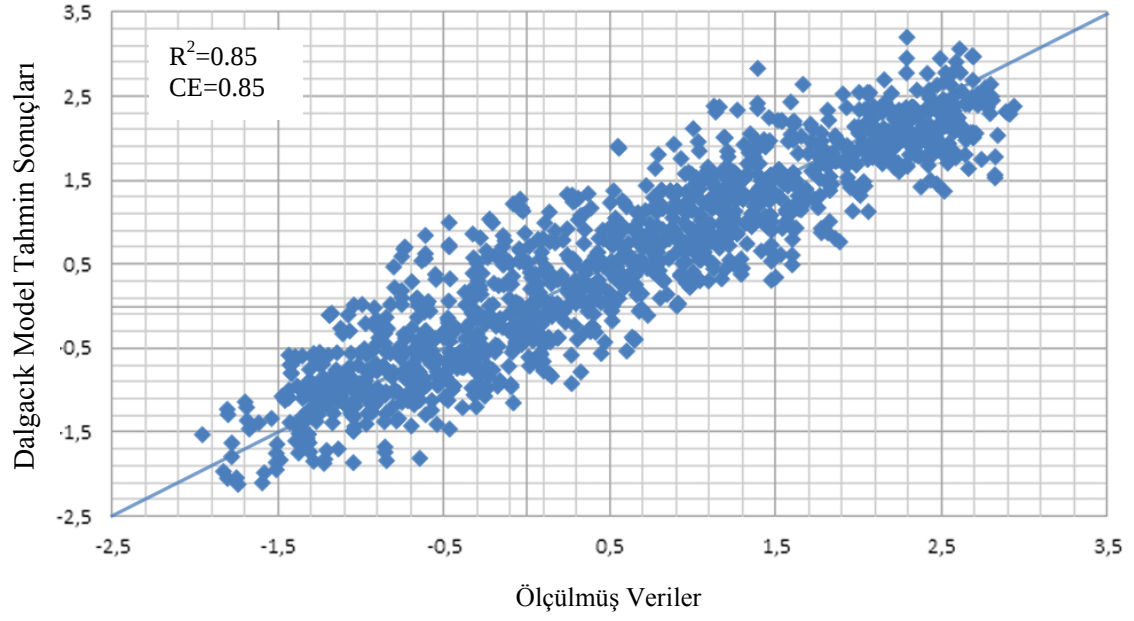
Şekil A.10 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



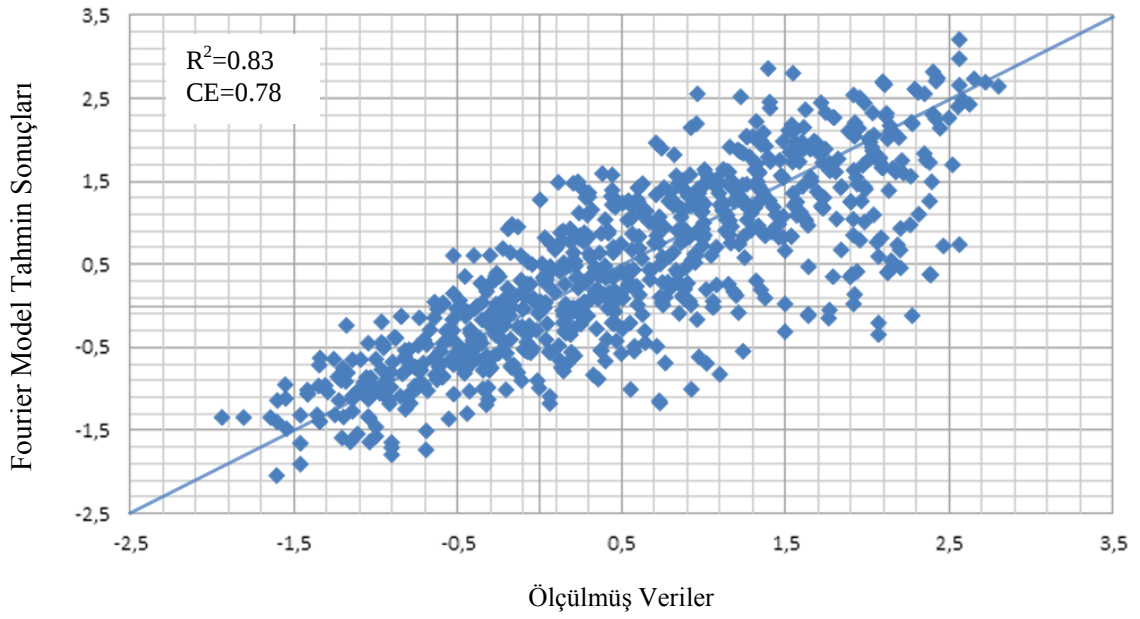
Şekil A.11 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



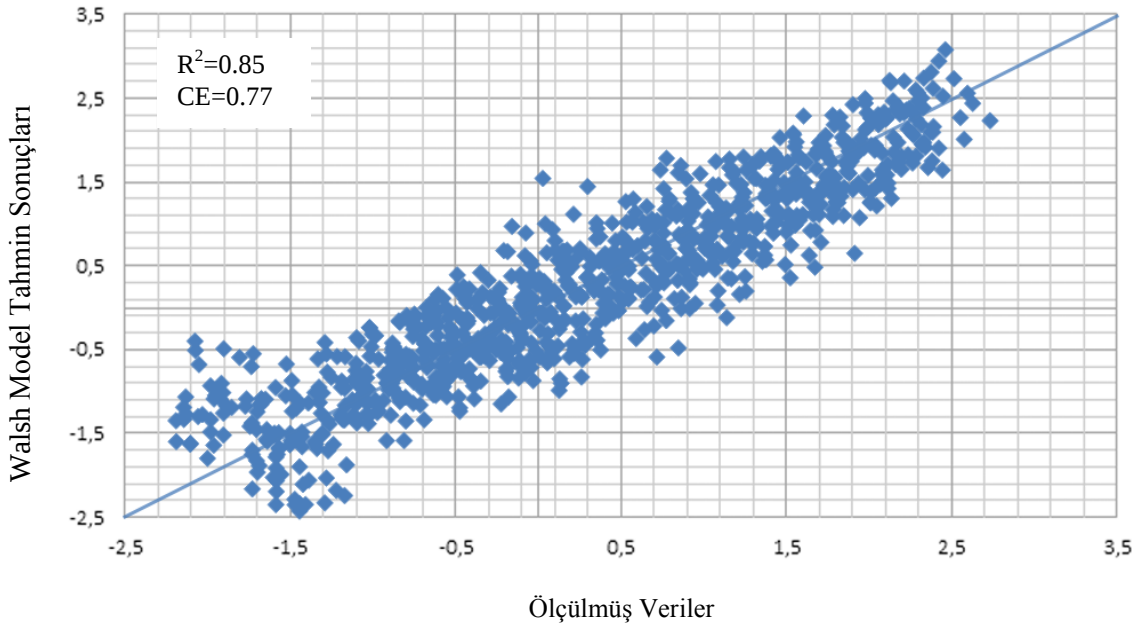
Şekil A.12 : 2 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli)



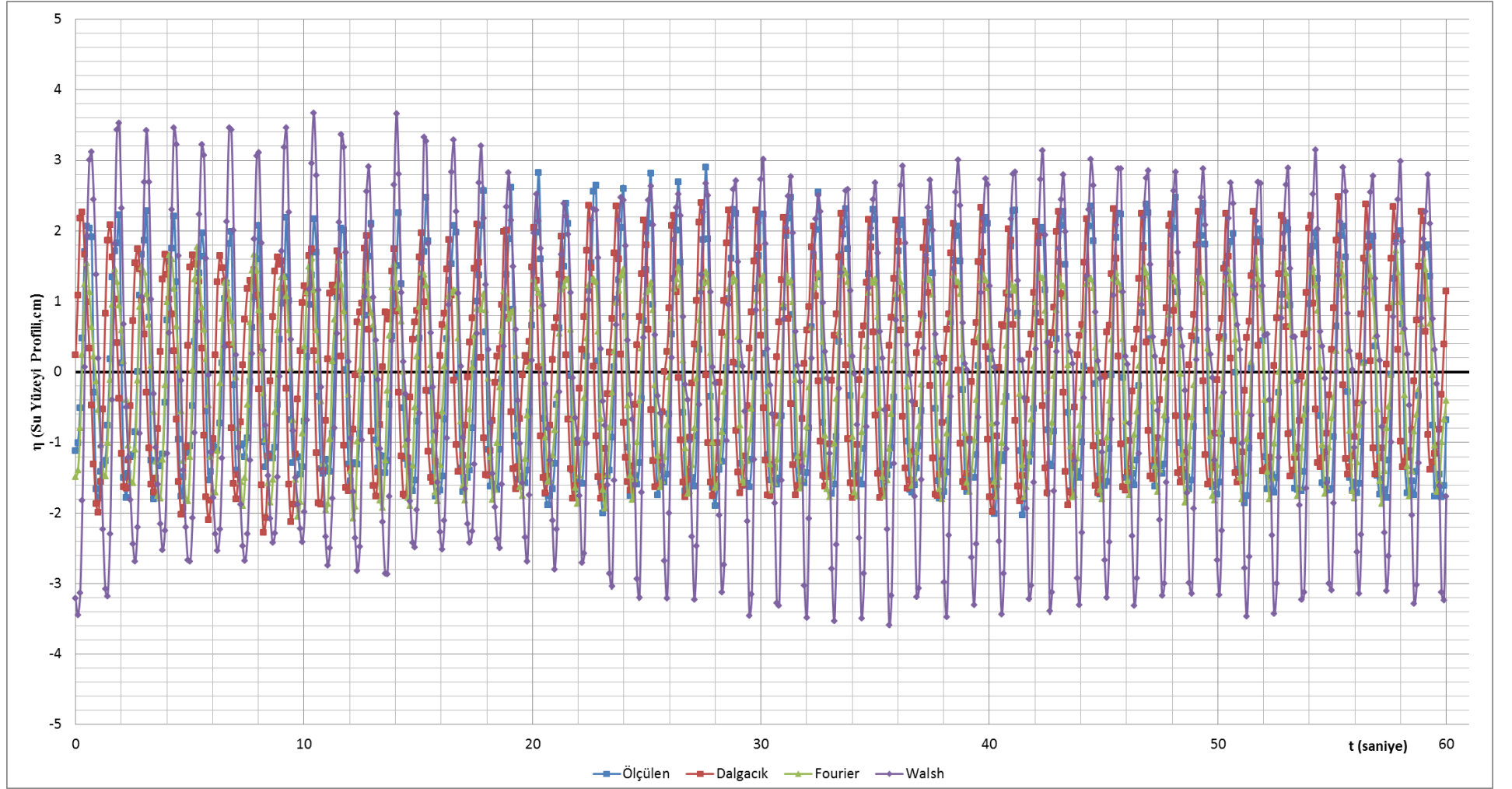
Şekil A.13 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Dalgacık modeli)



Şekil A.14 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Fourier modeli)



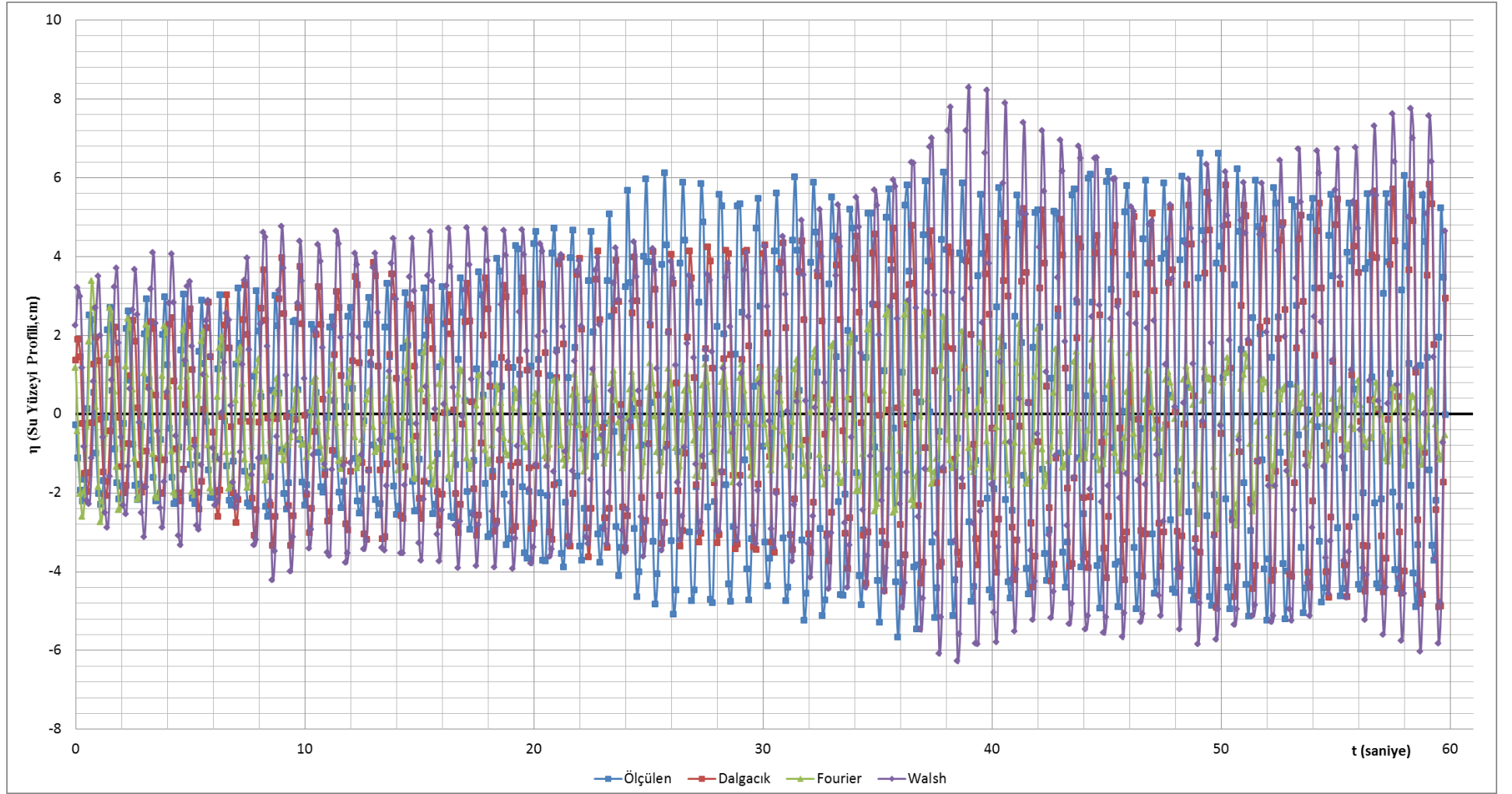
Şekil A.15 : 3 nolu düzensiz dalga verisi için 45 derecelik diagonal doğru (Walsh modeli



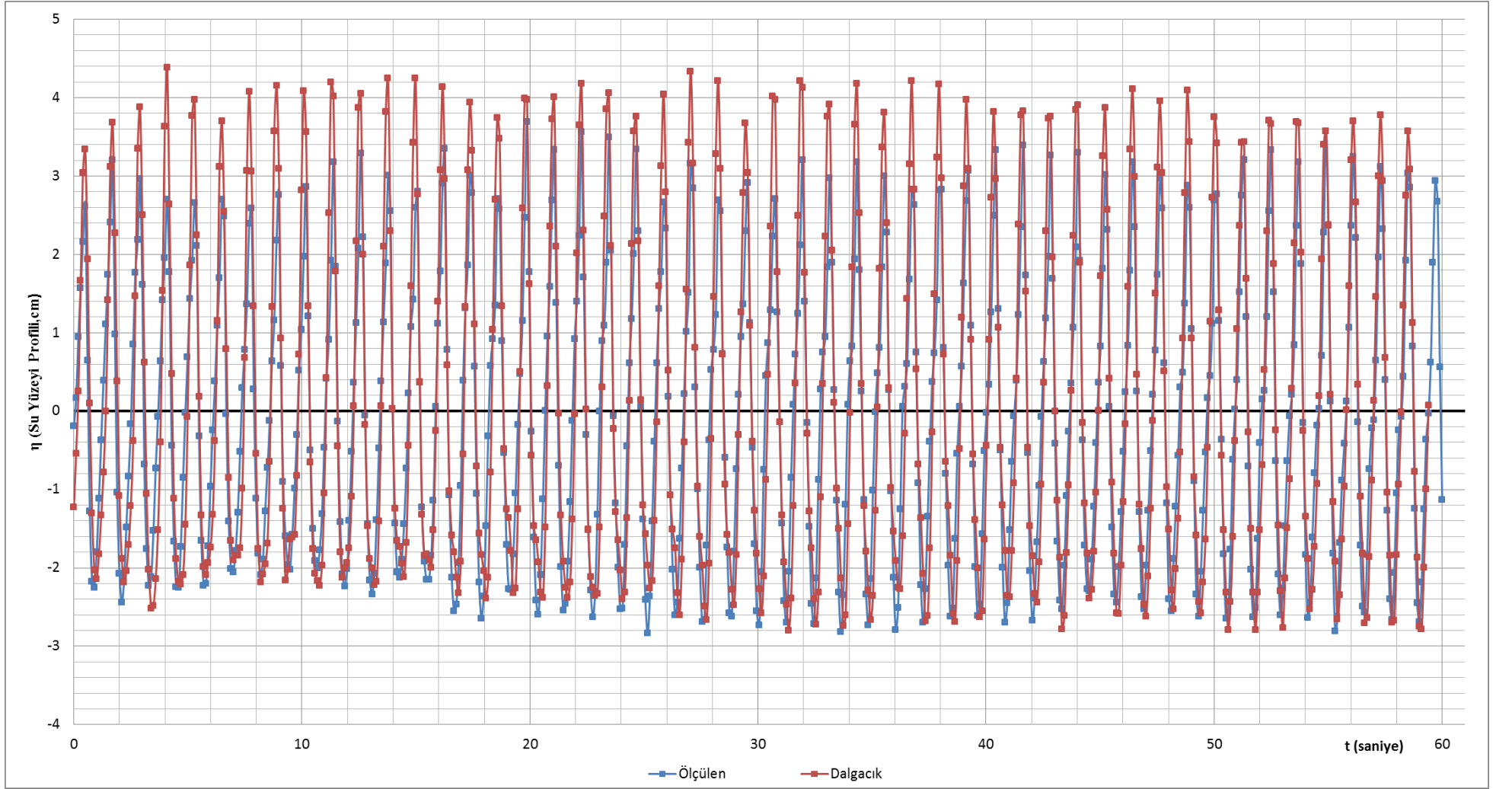
Şekil A.16 : 1 nolu düzenli dalganın su yüzeyi profili



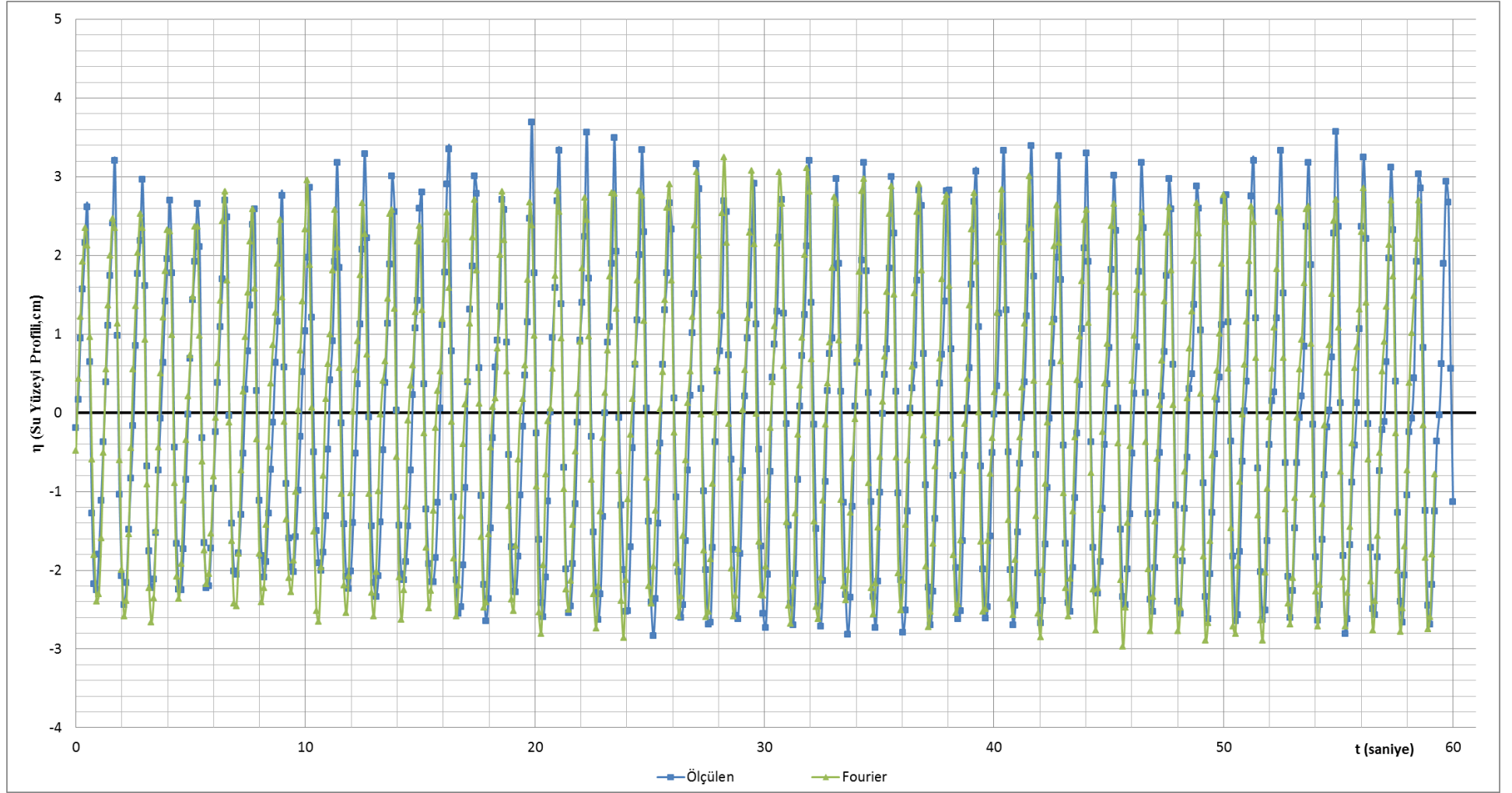
Şekil A.17 : 2 nolu düzenli dalgaanın su yüzeyi profili



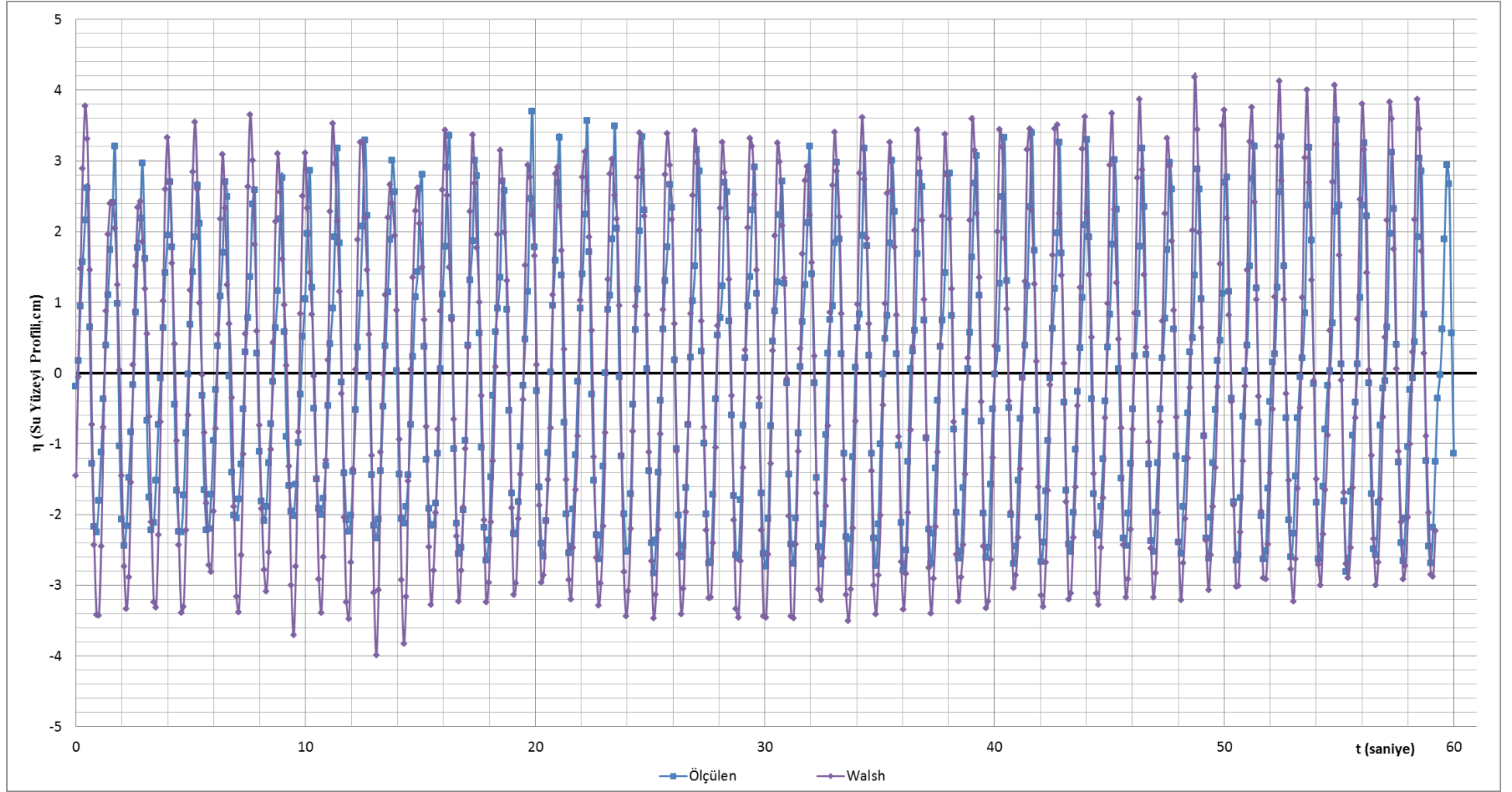
Şekil A.18 : 3 nolu düzenli dalgaanın su yüzeyi profili



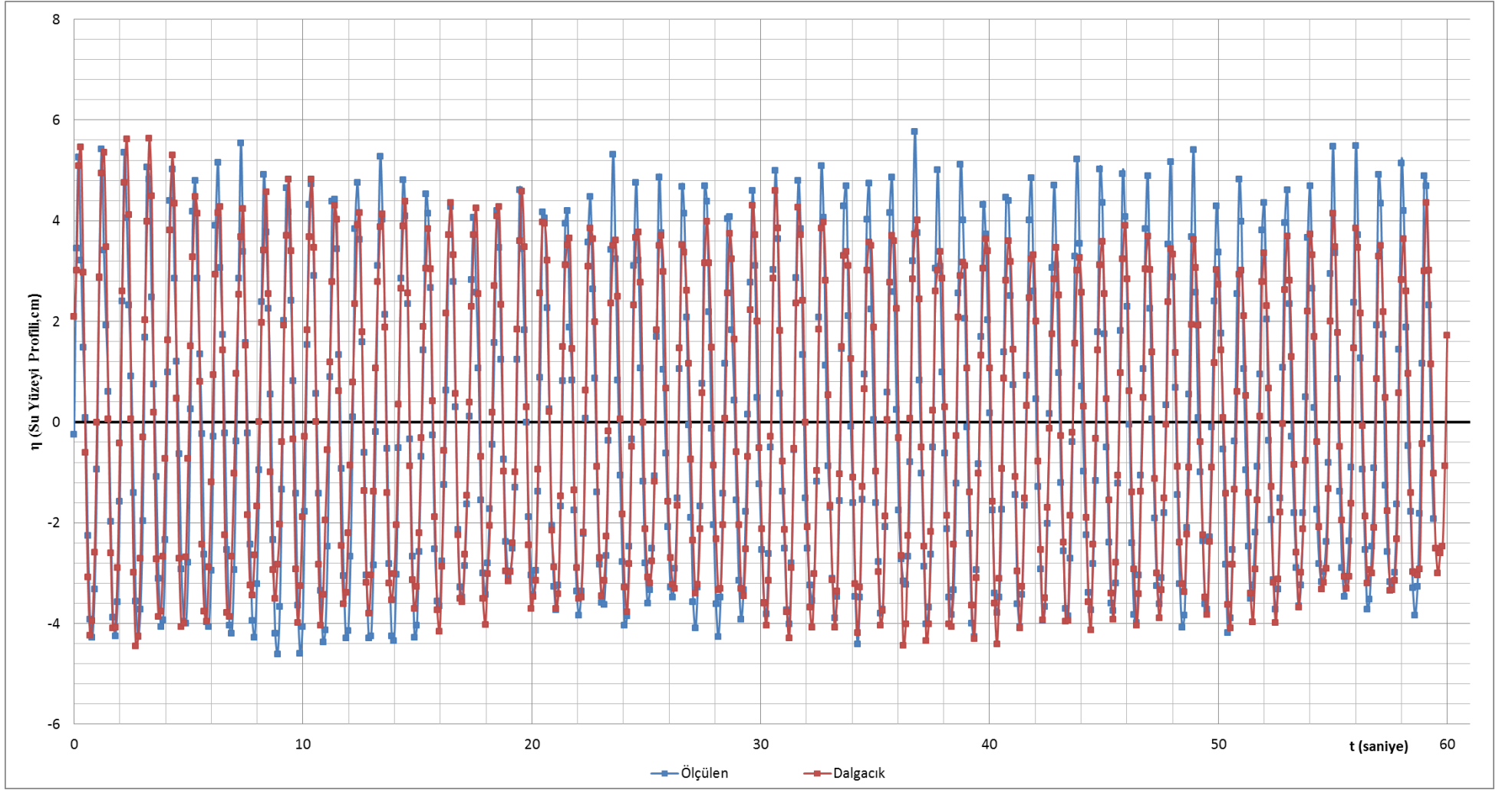
Şekil A.19 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri)



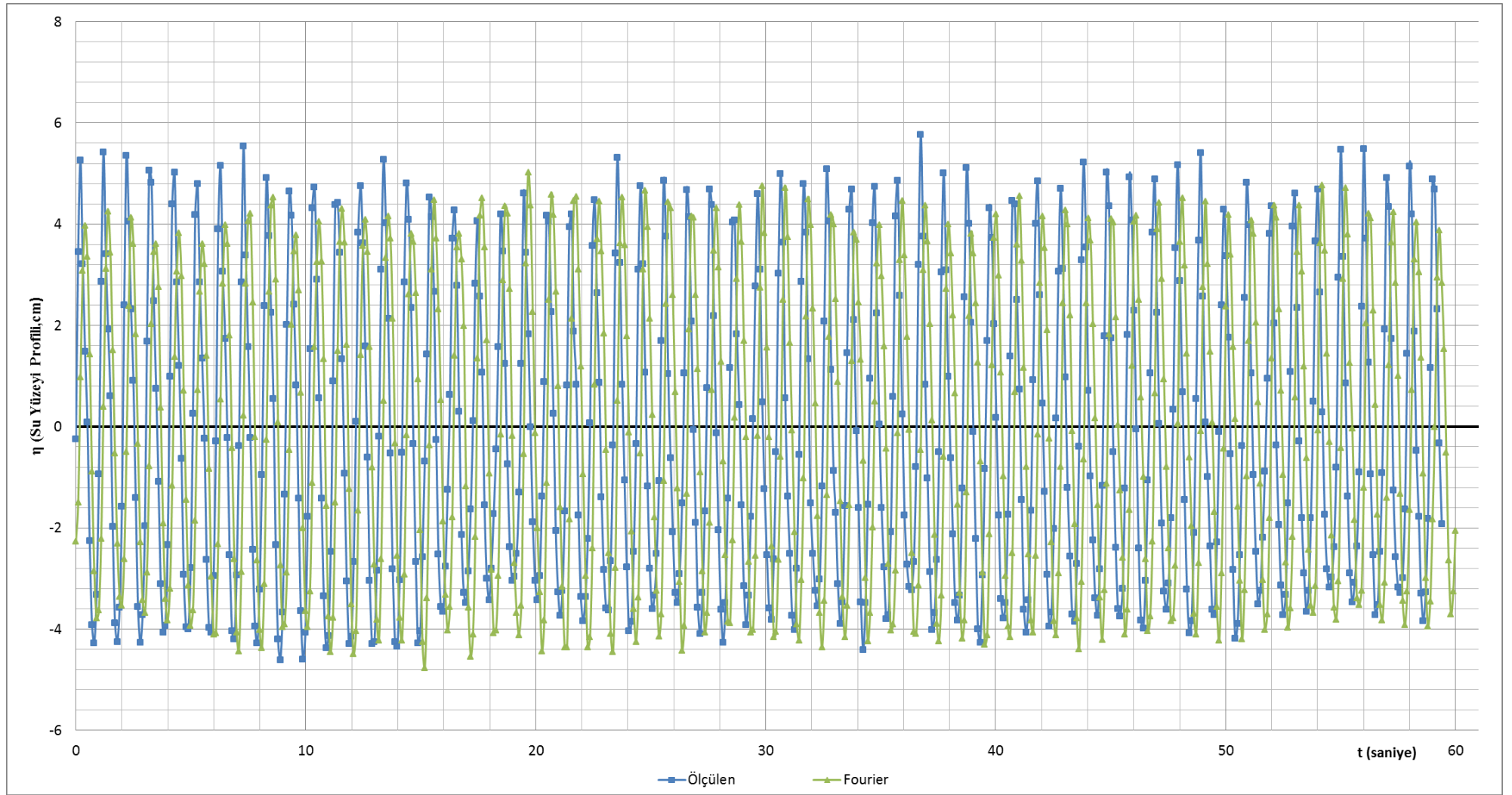
Şekil A.20 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri)



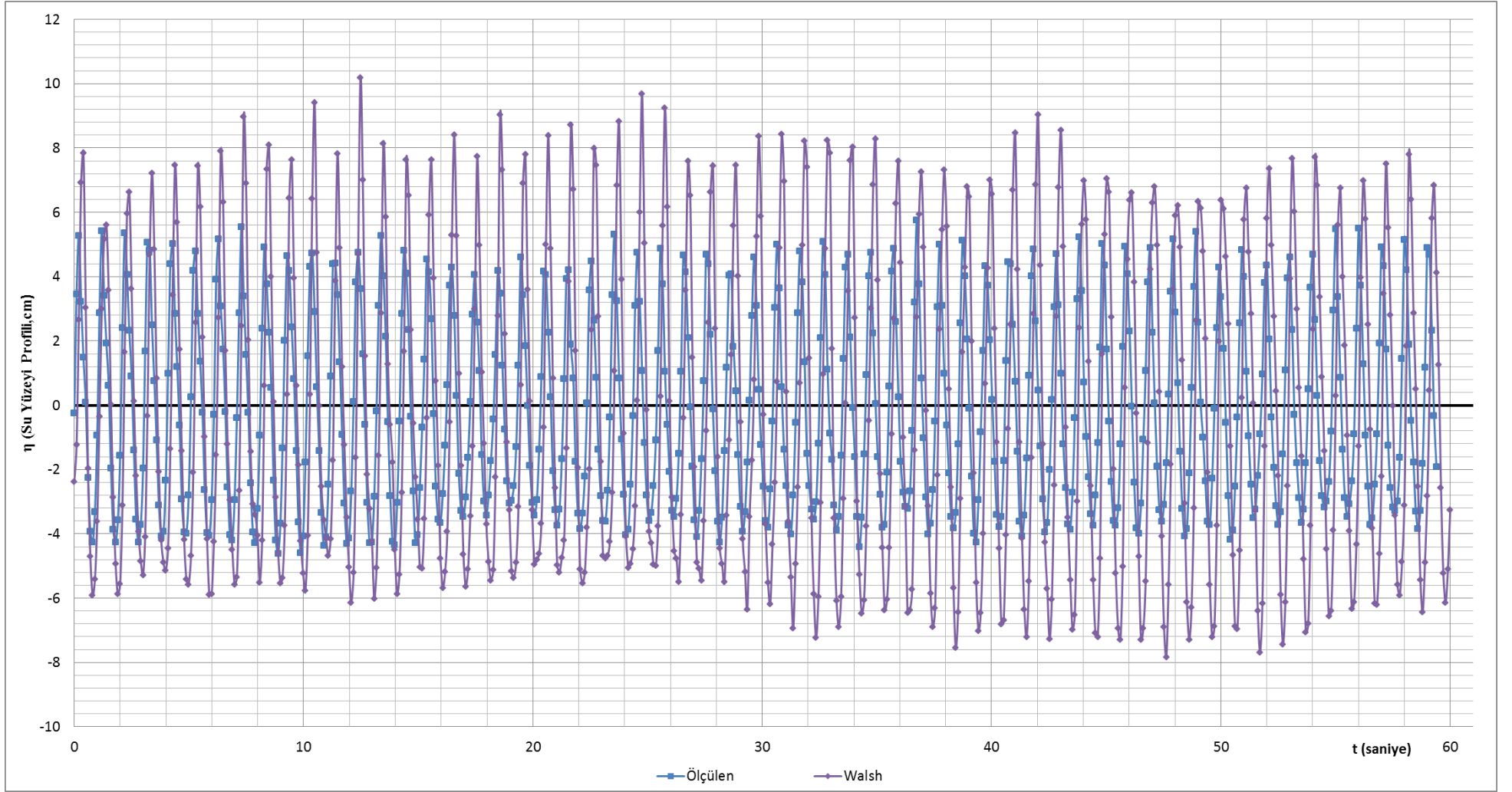
Şekil A.21 : 1 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri)



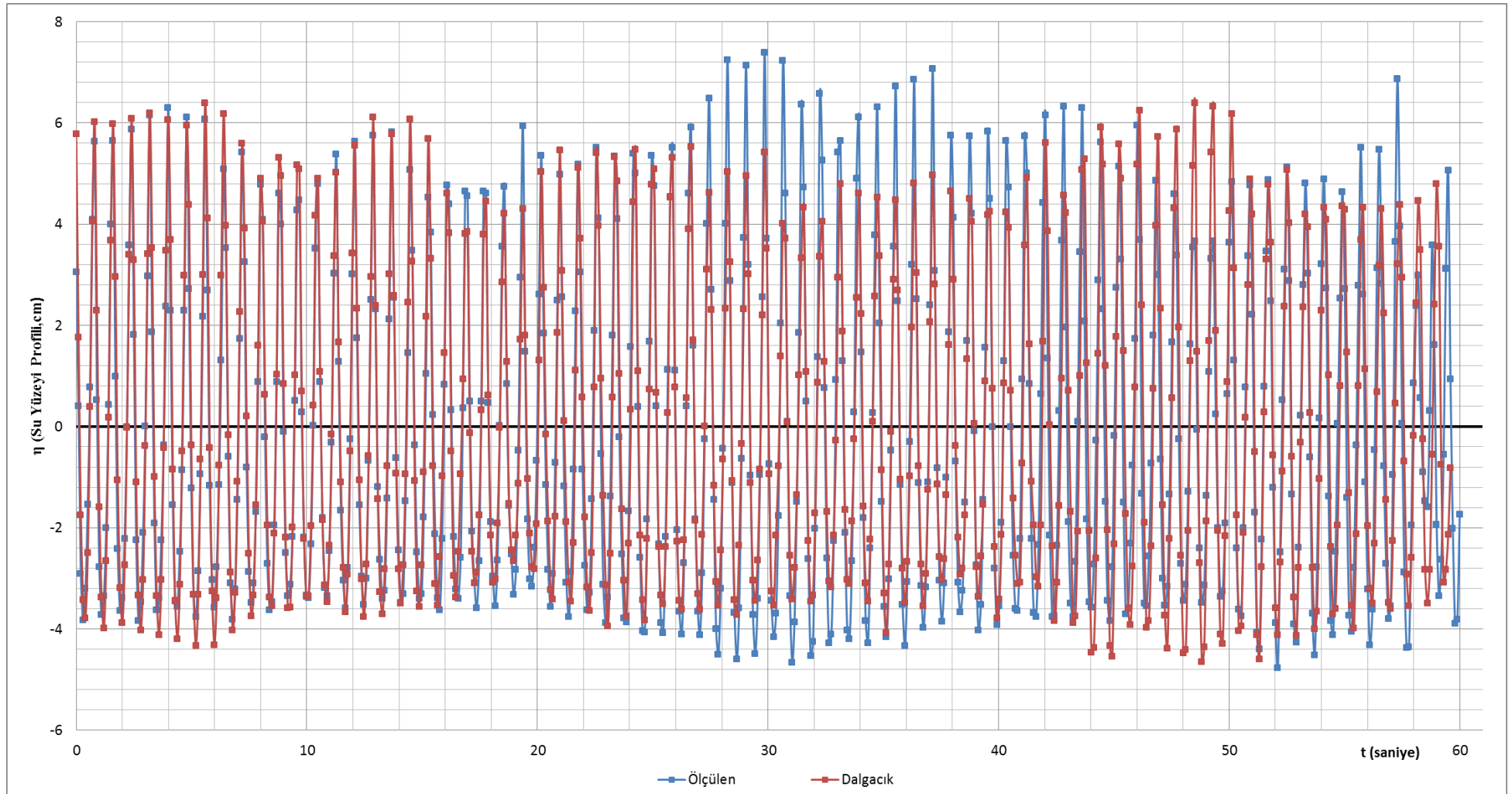
Şekil A.22 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri)



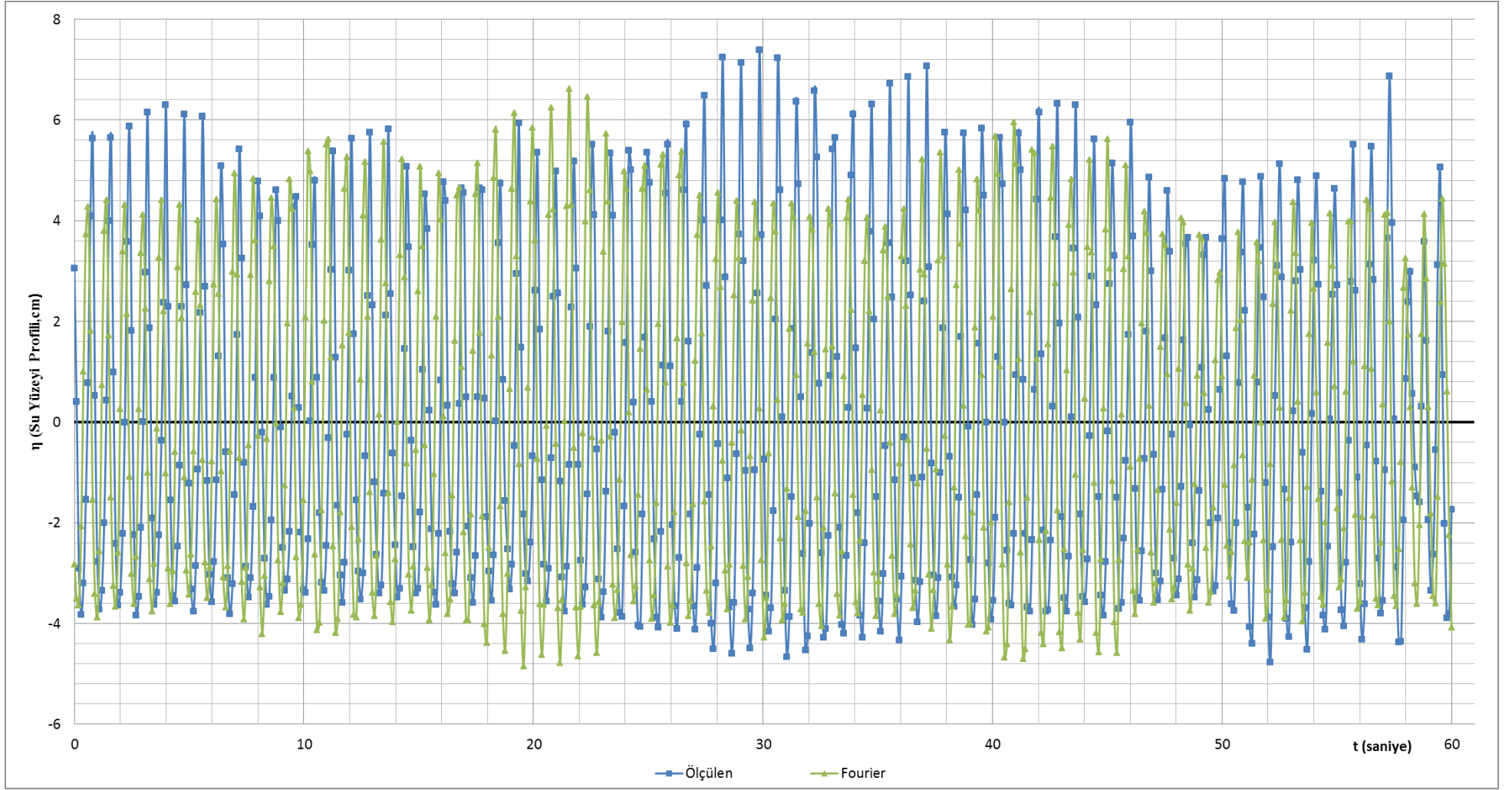
Şekil A.23 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri)



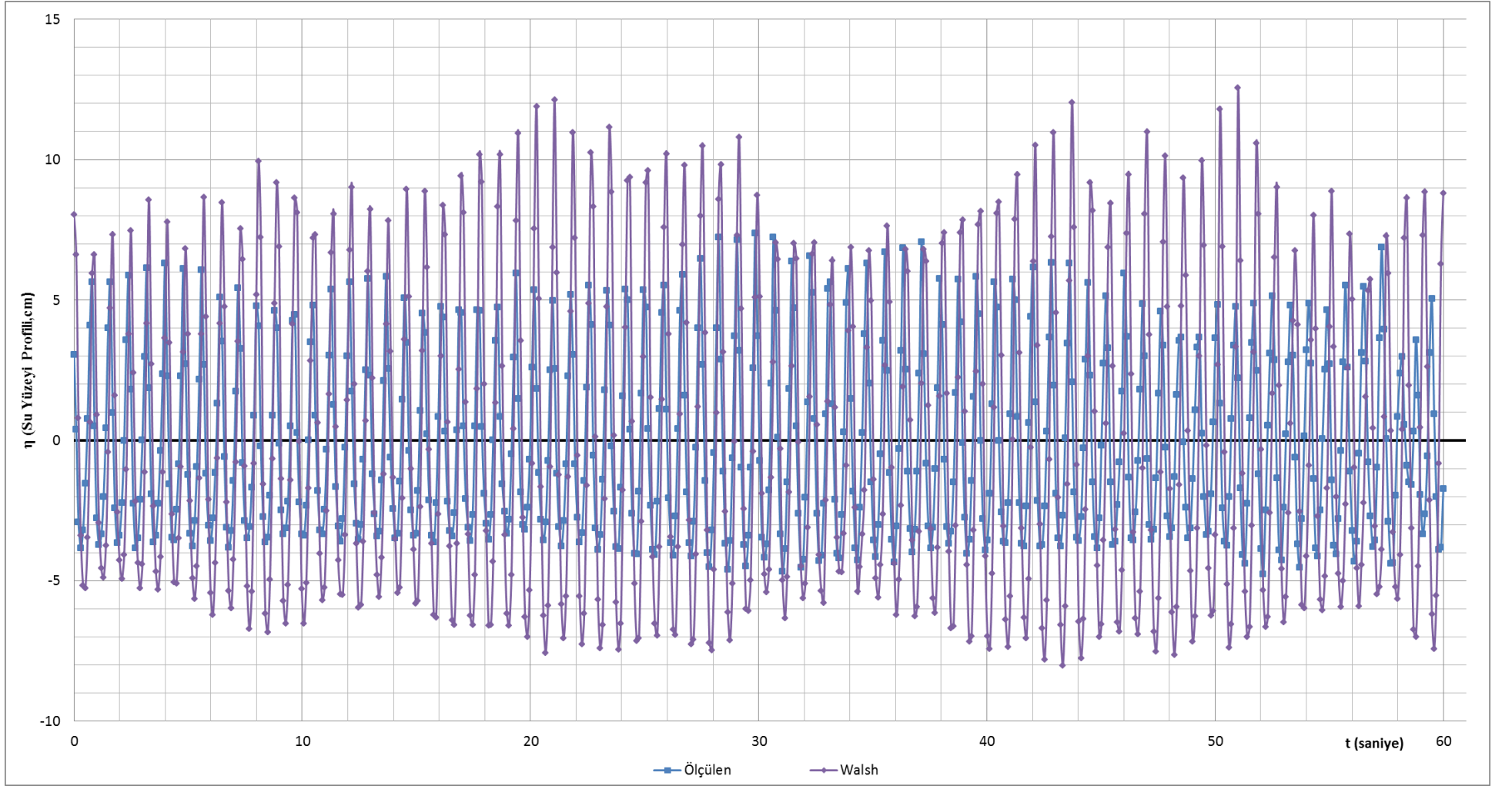
Şekil A.24 : 2 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri)



Şekil A.25 :3 nolu düzensiz dalganın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Dalgacık Tahmin Değerleri)



Şekil A.26 : 3 nolu düzensiz dalğanın su yüzeyi profili (Ölçülen değerler- Fourier Tahmin Değerleri)



Şekil A.27 : 3 nolu düzensiz dalga'nın su yüzevi profili (Ölçülen değerler- Walsh Tahmin Değerleri)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad:Elif Erkek

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir-1989

E-Posta: erkek.elif@gmail.com

Lisans: Çevre Mühendisliği