



**DEFORMASYON TAHMİNİNDE GRİ MODEL
UYGULAMASI: KEBAN BARAJI ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kürşat KAYA

091115114

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Geoteknik

Danışman: Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI

HAZİRAN 2019

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DEFORMASYON TAHMİNİNDE GRİ MODEL UYGULAMASI: KEBAN
BARAJI ÖRNEĞİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kürşat KAYA

091115114

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 17.05.2019

Tezin savunulduğu Tarih: 19.06.2019

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Geoteknik

Danışman: Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ULUKAVAK

Dr. Öğr. Üyesi Erdin ARICI

HAZİRAN-2019

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programında yapılmıştır.

Bu çalışmada Fırat Nehri üzerinde inşa edilmiş olan Keban Barajı'ndaki deformasyon ölçmelerinin belirlenmesinde ve analiz edilmesinde Gri Sistem metodunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, Keban Barajı'nda, jeoteknik ölçü yöntemi kullanılarak deformasyon ölçüleri yapılmış olan ölçü noktalarına ait boşluk suyu basınçları ve baraj göletindeki su seviyesindeki değişimler, Gri Sistem metoduyla tahmin edilmiştir. Tahmin edilen ölçüm değerlerine göre su kotundaki değişim miktarı ve boşluk suyu basıncı değerleri analiz edilmiştir. Tahmin edilen değerlere göre Keban Barajı'nda deformasyon analizi yapılmıştır. Gri Sistem metodunu kullanılarak deformasyon analizi yapmak için Matlab ortamı kullanılmıştır. Matlab ortamı kullanılarak tahmin değerleri elde edilmiş ve elde edilen tahmin değerlerine göre deformasyon analizi yapılmıştır.

Çalışmamızın giriş bölümünde; deformasyon ölçü yöntemleri, deformasyon analiz çeşitleri ve Gri Sistem yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. İlerleyen bölümlerde ise yazılım paketi kullanılarak gri yöntemle deformasyon ölçüm değerleri tahmin edilmiştir. Son bölümde ise sonuçlara ilişkin bulgulara yer verilmiştir.

Tez konusunun belirlenmesinde ve çalışmamın başından sonuna kadar her türlü desteği esirgemeyen, bir çok konuda ve çalışmalarında sayısız faydasını gördüğüm saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Erkan TANYILDIZI'na en derin şükranlarımı sunarım. Yardımlarından dolayı Doç. Dr. Nuri Murat YAĞMURLU, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ULUKAVAK ve Öğr. Grv. Buğra KAGIZMANLI'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmamızda referans verisi olarak kullandığımız bilgi ve belgeleri bizlerle paylaştığı için DSİ 9. Bölge Müdürlüğü Barajlar ve HES Şube Müdürlüğü personellerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince verdikleri sabırlı destekleri için eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

Kürşat KAYA
ELAZIĞ – 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	IX
SEMBOLLER LİSTESİ.....	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
2. MATERYAL VE METOT	5
2.1. Deformasyon Ölçme Yöntemleri.....	5
2.1.1. Jeoteknik (Fiziksel yada Mekanik) Ölçme Yöntemleri	5
2.1.2. Jeodezik Ölçme Yöntemleri	8
2.2. Deformasyon Analizinde Kullanılan Yöntemler	10
2.2.1. Bağlı Güven Elipsleri Yöntemi ile Deformasyon Analizi	10
2.2.2. S Transformasyon Yöntemi ile Deformasyon Analizi	10
2.2.3. Kinematik Model Yöntemi ile Deformasyon Analizi	11
2.2.4. Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi.....	11
2.2.5. Teta Kare (θ^2) Yöntemi ile Deformasyon Analizi	12
2.2.6. Deformasyon Ölçülerinin Dengelenmesi	12
2.2.7. Gri Sistem Yöntemi ile Deformasyon Analizi.....	13
2.2.8. Gri Sistemle Deformasyon Tahmini	14
2.3. Matlab Ortamında Hazırlanan Yazılım	20
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	22
3.1. Çalışma alanı	22
3.2. Bulgular	24
4. SONUÇ ve TARTIŞMA	34

KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	39



ÖZET

Yapıların ve yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesine ilişkin deformasyon ölçmeleri mühendislik jeodezisinin temel konuları arasında yer almaktadır. Bugün birçok alet kendisine özgü ölçü yöntemleriyle deformasyonların izlenmesinde kullanılmaktadır. Yerkabuğunun davranışlarıyla, büyük mühendislik yapılarının şekil, boyut ve yer değişimleri, farklı deformasyon analiz metotlarıyla belirlenmekte ve yorumlanmaktadır. Yapıların ve yerkabuğu hareketlerin deformasyon analiz metotları kullanılarak belirlenmesi için çoğunlukla bilgisayar yazılımı kullanılmaktadır.

Deformasyon analizinde, farklı sistemler ve teoriler kullanılmaktadır. Bunlardan biri de Gri Sistemdir. Gri Sistem, bulanık mantık yaklaşımına alternatif bir yöntem olarak sunulmuştur. Gri Sistem bugüne kadar birçok alanda kullanılmıştır. Örneğin, Türkiye için enflasyon tahmininde, elektrik dağıtım şirketlerinin talep tahmininde, sigorta şirketlerinin performanslarının belirlenmesinde, Türkiye'nin karbondioksit emisyon miktarının tahmininde, deri fizyolojisi analizinde, Borsa İstanbul'da tarım ve hayvancılık sektöründe işlem gören işletmelerin finansal performansının değerlendirilmesinde ve daha bir çok alanda çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, deformasyon ölçmelerinin belirlenmesinde ve analiz edilmesinde Gri Sistem metodunun kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Bu amaçla, Fırat Nehri üzerine inşa edilmiş olan Keban Barajı'nın, inşaat aşamasından günümüze kadar geçen sürede baraj göletindeki su seviyesi ve kil dolgu kısmında yer alan piyezometre aletlerinin kayıt ettiği boşluk suyu basınç değerlerinin değişimleri kullanılmıştır. Bu değerlerdeki değişim miktarları, Gri Sistem metoduyla tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon Analizi, Gri Sistem, Deformasyon Ölçmeleri, Keban Barajı.

SUMMARY

Grey Model Application In Deformation Prediction: Keban Dam Exemplified.

Deformation measurements for the determination of structures and Earth's crust movements are among the main subjects of engineering Geodesy. Today, many tools are used to monitor deformations with their specific measurement methods. The behavior of the Earth's crust, the shape, size and location changes of the large engineering structures are determined and interpreted by different deformation analysis methods. Computer software is mostly used to determine the structures and the Earth's crust movements by using deformation analysis methods.

Different systems and theories are used in deformation analysis. One of them is the Grey System. A fuzzy logic controller is a set of Fuzzy Logic Controllers. The Grey System has been used in many areas so far. For example, studies have been carried out in forecasting inflation for Turkey, forecasting demand for electricity distribution companies, determining performance of insurance companies, estimating the carbon dioxide emissions of Turkey, analyzing leather physiology, evaluating financial performance of companies operating in the agricultural and livestock sectors in Istanbul, and more.

In this study, the usability of Grey System method was investigated in determining and analyzing deformation measurements.

For this purpose, the Keban Dam, built on the Euphrates River, has been used to change the water level in the dam pond and the water pressure values recorded by the piezometers in the clay filling area. The amount of change in these values was estimated by the Grey System method.

Key words: Deformation Analysis, Grey System, Deformation Measurements, Keban Dam.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Keban Barajı.....	23
Şekil 3.2. Fontenelle Barajı'nda sızma sonucunda gövdede yıkılma.	24
Şekil 3.3. 5 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.....	29
Şekil 3.4. 13 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.....	31
Şekil 3.5. 19 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.....	33



TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Tahmin modelinin doğruluk sınıflandırılması.	17
Tablo 3.1. Su kotuna ait ölç ve tahmin değerleri.	26
Tablo 3.2. 5 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri.	27
Tablo 3.3. 5 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu...	28
Tablo 3.4. 13 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri.	30
Tablo 3.5. 13 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu.	31
Tablo 3.6. 19 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri.	32
Tablo 3.7. 19 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu.	33

KISALTMALAR LİSTESİ

AGO	: Birikimli Üretim Operatörü (Accumulating Geneation Operator)
GM	: Gri Model
GM(1,1)	: Gri Modelin Tek Değişkenli Tahmin Modeli
GM(1,N)	: Gri Model N Değişkenli Tahmin Modeli
MGM	: Çok Değişkenli Gri Model (Multi-Variable Grey Model)
YAS	: Yer altı Su Seviyesi
HES	: Hidro elektrik Santrali

SEMBOLLER LİSTESİ

θ^2	:Birim ağırlıklı ölçünün öncül varyansı
m^2	:Ortalama varyans
$X^{(0)}$	:Ham veri seti
$X^{(1)}$	:Birinci dereceden toplam üretim operatörü
$Z^{(1)}$	:Ortalama değer üretim operatörü
a, b	:Tahmin parametreleri
$\wedge$ a	:Parametre değerlerinin matris gösterimi
B	:Ortalama değer üretim operatörünün matris gösterimi
Y	:Ham veri setinin matris gösterimi
$\hat{x}$	:Tahmin modeli
$\varepsilon^{(0)}(k)$	:Tahmin hatası
$\delta^{(0)}(k)$	:Hata oranı
P	:Tahmin hatasının doğruluk parametresi
ξ	:Tahmin edilen verinin hata ortalaması
S_1	:Tahmin edilen hata kareleri ortalaması
m	:Gözlemlenen verinin ortalaması
S_2	:Gözlemlenen verinin hata kareleri ortalaması
C	:Tahmin modelinin hata oranını
σ^2	:Tahmin modelinin ortalama doğruluğu
v_i	:Tahmin değerinin hata miktarı,
$\hat{X}$	:Ters birikimli üretim operatörü

1. GİRİŞ

Büyük mühendislik yapılar, bir ülkenin sosyo-ekonomik gelişmişliğinin bir göstergesidir. Yüksek bütçe ve fazla emek harcanarak inşa edilen bu yapıların bakım ve tadilatlarının eksiksiz ve zamanında yapılması önem taşımaktadır. Bu sebepten, bu tür yapılarda ve çevresinde meydana gelen değişimlerin izlenmesi, belirlenmesi ve tanımlanması önemlidir.

Büyük maliyetlerle inşa edilen mühendislik yapılarda, ortaya çıkabilecek bir olumsuzluk, çevresinde yaşayan canlılar ve çevre için ciddi zararlara neden olmaktadır. Bu zararların önüne geçmek için yapılarda meydana gelen değişimlere sebep olan etmenlerin belirlenmesi gerekir. Yapılarda değişime sebep olan bir çok etmenlerden söz edilebilir. Bu etmenlerden, önlenebilir olanlar için gerekli tedbirler zamanında alınabilir.

Yapılarda meydana gelen değişimlerin nedenleri:

- Yapı zeminindeki fiziksel değişimler,
- Yapı temelindeki gevşemeler,
- Nem, sıcaklık, basınç vb. değişimler,
- Yapının kendi ağırlığı ve kullanılan malzemenin türü,
- Bölgedeki yerkabuğu hareketleri

olarak sıralanabilir [1].

Değişime neden olan etmenlerin yapı üzerinde nasıl bir etki yarattığı, belli periyotlarda yapılan gözlemlerle anlaşılır. Yapılan bu gözlemler deformasyon olarak tanımlanır. Deformasyonun belirlenebilmesi için yapının, zamana bağlı olarak sürekli gözlemlenmesi gerekir.

Toplanan gözlem değerleri birbirinden farklı istatistiksel veya matematiksel yöntemlerle değerlendirilmesine deformasyon analizi denir. Farklı yöntemlerle analiz edilen verilerinin doğruluğu, gözlem değerlerinin sayısına bağlıdır. Ne kadar çok gözlem değeri varsa analiz sonuçları o derece doğrudur.

Deformasyonun büyüklüğünü ve yönünü belirlemek amacıyla jeodezik ve jeoteknik (fiziksel yada mekanik) yöntemlerle yapılan ölçümlere deformasyon ölçmeleri denilir.

Deformasyon ölçmeleri daha çok bir yapıdaki sorunun belirlenmesi ve bu sorunun doğuracağı tehlikenin önüne geçilebilmesi amacıyla yapılır. Ortaya çıkan sorun ve

tehlike, zamanında tespit edilip, gerekli önlemler alınırsa deformasyon ölçmeleri amacına ulaşmış olur.

Deformasyon ölçülerini doğru şekilde analiz edebilmek, deformasyona uğrayan cismin zamana bağlı olarak sürekli gözlemlenmesi ile mümkündür. Bu amaçla isabetli analiz değerleri elde etmek için çok sayıdaki gözlem değerlerine ihtiyaç vardır. Yapılan gözlem değerlerinden ilki referans değeri, sonraki yapılan tüm gözlemler ise tekrar gözlemleridir.

Gözlem değerlerinin tekrarlanma periyodu, cisimde meydana gelen değişime bağlıdır. Cisim üzerinde meydana gelen değişim hızı yavaş ve çok küçük miktarlarda oluşuyor ise jeodezik yöntemlerle değişim miktarı tespit edilir. Cisim üzerindeki değişim miktarı göz ile farkedilir derecede ve hızlı bir şekilde oluşuyorsa, gözlemler jeoteknik yöntemler ile yapılması gerekir.

Deformasyon gözlemleri ile cisimleri etkileyen faktörlerin büyüklüğü ve yönü belirlendikten sonra değişimlerin cisim üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde yorumlanması gerekir.

Cisimlerde meydana gelen deformasyonların yorumlanmasında, çeşitli analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılacak deformasyon analiz yönteminin seçilmesi, deformasyon gözlemlerinin hangi yöntemle yapıldığına bağlıdır.

Genellikle aşağıda verilen deformasyon analizi yöntemleri kullanılmaktadır.

- Bağlı güven elipsleri yöntemi ile deformasyon analizi
- S transformasyonu yardımıyla deformasyon analizi
- Mierlo yöntemiyle deformasyon analizi
- Kinematik modeller ile deformasyon analizi
- Cholesky çarpanlara ayırma yöntemiyle deformasyon analizi
- θ^2 ölçütü veya ortalama aykırılıklar yöntemiyle deformasyon analizi
- Gri Sistem ile deformasyon analizi

Deformasyon analiz yöntemleri arasında bulunan farklılıklar; kullanım kolaylığı, ağırlık yapısı, ölçme planı vb. şeklinde sıralanabilir. Bütün bunların yanı sıra hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın deformasyon analizi yapabilmek için belli sıklıkla yapılmış deformasyon ölçü değerlerine ihtiyaç vardır.

Yeterli çalışmanın yapılmadığı, gerekli verilerin oluşturulmadığı veya oldukça kısıtlı veriye erişilebildiği durumlar söz konusu olabilir. Bu gibi durumlarda

memnuniyet verici uygulamalar yapabilme gücünde olan ve deformasyon analizi yapabilme kabiliyetine sahip olan Gri Sistem yaklaşımı ortaya konulmuştur.

Gri Sistemde temel düşünce, belirsiz sistemlerin davranışlarını sınırlı sayıda veri yardımı ile tahmin etmektir. Bu tahmin yönteminde, beyaz ve siyah renkler sembol olarak kullanılmıştır. Beyaz renk belirsizliğin olmadığı kusursuz veriyi, siyah renk ise zıt özelliklere sahip bilgiyi sembolize etmektedir. Bu iki bilgi arasında kalan ve yalnızca sınırlı bilgiye sahip olan veriler ise Gri Sistem olarak isimlendirilmektedir [2].

Gri Sistem teorisi ilk ortaya atıldığı günden bu güne kadar pek çok alanda uygulama imkânı bulmuştur. 1985-1993 yılları arasındaki beş yıllık veriyi kullanarak Luo Yang şehrinin atık su miktarı tahmin edilmiştir [3]. Tayvan’da alkol içermeyen içeceklerin satış tahmininde Gri Sistemi kullanılmıştır [4]. Tayvan’ın Hsichih şehrinde meydana gelebilecek tayfun zararlarının tahmininde Gri Sistemden yararlanılmıştır [5]. 1993–1997 yıllarına ait verileri kullanarak Hindistan’da yıllık yağış miktarının tahmininde gri sitem teorisi kullanılmıştır [6]. Trafik kazalarının tahmin edilmesinde gri tahmin yöntemi kullanılmıştır [7]. Türkiye’nin büyüme oranı faktörlerinin analizinde [8], Türk lojistik firmalarının performans ölçümünde [9], yazılım projelerinin kalite performanslarının derecelendirmesinde [10] ve daha birçok alanda Gri Sistem kullanılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Barajlar, köprüler, gökdelenler vb. büyük yapılar, sürekli fiziksel ve geometrik değişimlere maruz kalırlar. Bu tür büyük yapılarda, zamanla oluşabilecek fiziksel ve geometrik değişimler belli periyotlarla gözlemlenmelidir. Tespit edilen değişimlerin büyüklüğü analiz edilmeli ve kritik değerlere yaklaşp yaklaşmadıkları belirlenmeye çalışılmalıdır. Böylece, gerekli tedbirler zamanında alınacak ve yapının emniyeti sağlanmış olacaktır.

Büyük mühendislik yapılarında değişime sebep olan önlenebilecek etmenler, dikkatle izlenmeli ve hareketleri iyi analiz edilmelidir. Değişime sebep olan etmenlerin yapı üzerinde nasıl bir etki yarattığı, belli periyotlarda yapılan gözlemler ile anlaşılır.

Bu çalışmada büyük bir öneme sahip olan Keban Barajı’nın deformasyon ölçmeleri ve deformasyon analizi farklı bir yaklaşımla irdelenmiştir. Çalışmamızda bir çok kullanım alanına sahip olan gri tahmin yönteminin, deformasyon ölçüleri kullanılarak

deformasyon analizinde kullanılabilirliği Matlab ortamında hazırlanan yazılım paketi kullanılarak irdelenmiştir.

Bu amaçla, daha önceden periyodik olarak deformasyon ölçüleri yapılmış olan Keban Barajı'na ait deformasyon verileri referans alınmıştır. Elazığ ili civarında Fırat Nehri üzerine inşa edilmiş olan Keban Barajı, su tutma tarihi olan 1975 yılından bu yana düzenli periyotlarla deformasyon ölçüleri yapılmış olmasından dolayı tercih edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Gri Sistem yöntemi, Matlab ortamında hazırlanan bir yazılım paketi haline getirilmiştir. Bu yazılım paketine deformasyon ölçülerine ait veriler girilerek, gelecek dönemlere ait deformasyon ölçülerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Deformasyon ölçme yöntemleri, kullanılan ölçü aletleri, ölçüm yöntemi ve ölçüm yeri bakımından, Jeoteknik (fiziksel yada mekanik) ölçme yöntemleri ve jeodezik ölçme yöntemleri olarak iki grupta inceleyebiliriz.

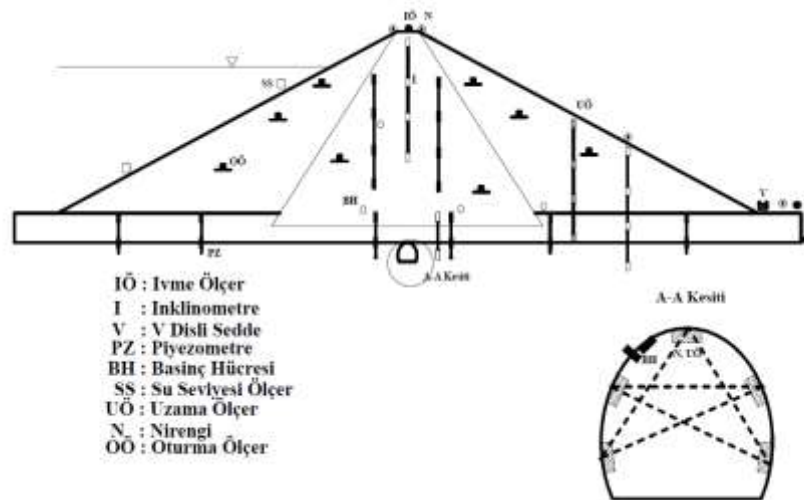
2.1.1 Jeoteknik (Fiziksel yada Mekanik) Ölçme Yöntemleri

Jeoteknik yöntemle yapılan deformasyon ölçülerinde kullanılan ölçü aletleri, yapının temelinde, gövdesi içine veya yüzeyine yerleştirilir (Şekil 2.1). Bu ölçü aletleri ile yapı içerisinde yerleştirildiği yerdeki yatay ve düşey hareketler ölçülür. Ölçülen hareketler, deformasyon ölçüsü yapılan yapıdan uzak bir noktada kontrol edilir [2].

Jeoteknik yöntem ile yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar, yapının bütününe hareketinden ziyade, yerleştirildiği noktadaki değişimi algılarlar.

Bu yöntem ile genelde toplam gerilmeler ile gerilme değişimi, deformasyon, yük ile birim yer değiştirme, ısı vb. değerler ölçülür.

Jeoteknik yöntemle yapılan ölçülerde kullanılan bazı aletler; piyezometreler, inklinometreler, gerilme ölçerler ve su basınç ölçerlerdir.



Şekil 2.1. Dolgu barajı üzerinde ölçüm ekipmanlarının yerleştirilmesi [11].

a) Piyezometreler

Piyezometreler, özellikle baraj temelindeki sızmayı, enjeksiyon perdesinin efektifliğini yeraltı su seviyesini (YAS) kontrol etmek amacıyla kullanılan ölçüm aletleridir [12].



Şekil 2.2. Piyezometreler.

Piyezometreler %0,5 doğruluk ve %0,1 hassasiyetinde ölçüm yapabilme kapasitesine sahip, baraj yüksekliğine bağlı olarak istenilen kot yüksekliğinde ve istenilen sayıda baraj kreti içerisine tesis edilirler (Şekil 2.2). Elektronik, titreyen telli, açık uçlu depolu, kapalı uçlu depolu, çift tüplü hidrolik ve pnömatik tipte olanları mevcuttur [12].

 KESİT NO		Barajın Adı :		Tarih:		
		Rezervuar Su Seviyesi:		Kuyruk Suyu seviyesi:		
		Ölçümü Yapan:		$P=(L^2 \times A)+(L \times B)+C$ (kPa)		
Uç No	Yerleştirilme Kotu	Kalibrasyon Sabiti A-B-C	İlk Okuma (Hz)	Son Okuma (Hz)	Basınç Değeri P (mPa)	m/SS
a	b	c	d	e	f	g = b+f

Şekil 2.3. Piyezometre okuma karnesi [12].

Piyezometreler ile yapılan ölçümler özel karnelerine kaydedilir (Şekil 2.3). Piyezometre okuma karnelerinde özellikle ölçü tarihi, piyezometrenin yerleştirildiği kot, barajdaki su rezervinin kotu ve yapılan boşluk suyu basınç farkları kaydedilir.

b) İnklinometreler

Baraj kretinde yerleştirilen kesitte ve derinlikte yatay deformasyonları ölçmek için iki ana parçadan oluşan bir sistemdir (Şekil 2.4).

Bu parçalardan biri, üzerinde birbirleriyle 90° lik açı yapan 4 yiv bulunan alüminyum, fiberglas veya dayanıklı PVC den yapılmış klavuz boruları, teleskopik bağlantı kaplinleri, kilitlenebilir alt ve üst koruma kapları, enjeksiyon valfi, kablo indirme ve çekme adaptöründen oluşan şase kısmı, diğeride iki yönlü servo-ivmeli metrik, ölçme aralığı $\pm 90^\circ$ olacak şekilde tekerleri klavuz boruları içinde rahatça hareket edebilen ölçüm torpilinden oluşmuştur. Torpilin okuma hassasiyeti 30 m'de 4 mm civarındadır [12].



Şekil 2.4. İnklinometre [12].

c) Gerilme Ölçerler

Gövde içerisinde betonun birim deformasyon ve zorlarını ölçmeye yarayan cihazlardır. Bunlar ya betonun içine gömülürler yada yüzeye bağlanırlar (Şekil 2.5). Cihazın etrafında gerilme dağılımını engelleyecek destek veya sıkıştırılmış nesne (takoz vs.) olmamalıdır. Gerilim ölçer cihazlar genellikle 3000 μ gerilim okuma kapasitesine

sahip, 1 μ duyarlılık, % 0,1 doğrulukta ve -20° ila +70° arası sıcaklık ölçebilen termometrelere sahip olması gerekir [12].



Şekil 2.5. Gerilme Ölçer [12].

d) Su Basınç Ölçerler

Dolgu barajlarda rasat kuyusunun işlevini görür. Mansap tarafında ve filitre zonunun tabanına yerleştirilir. Cihaz olarak normal dolgu ve temel tipi elektrikli veya titreşen telli piyezometrelerin aynısıdır. Tek farkı ise filitre ünitesinin bulunmamasıdır. Teknik olarak, 1,7-3,5 Mpa okuma kapasiteli, %0,1 duyarlılıkta,%0,5 doğrulukta ve -20° ila +100° ölçüm sıcaklığına sahip olması gerekir [12].

2.1.2 Jeodezik Ölçme Yöntemleri

Jeodezik ölçme yöntemleri, düşey yöndeki deformasyon ve yatay yöndeki deformasyon ölçme yöntemleri olarak ikiye ayrılır. Her iki ölçme yöntemi, kullanılan ölçü aletleri ve ölçüm hassasiyetleri bakımından farklılık gösterirler.

a) Düşey Yöndeki Deformasyonlar

Düşey yöndeki deformasyonlar, yapılarda oturma veya çökme şeklinde kendini gösterir. Düşey yönde yapılan bu hareket yapının kendisinden ziyade yapının inşa edildiği zemin ile ilgili bir durumdur.

Düşey yöndeki deformasyonlar, düşey açı ölçekbilen veya yükseklik farkı ölçekbilen aletler ile belirlenir. Bu aletler ile hassas geometrik nivelman veya hassas trigonometrik nivelman ölçü yöntemleri ile veri elde edilir. Yöntemlerden en çok hassas geometrik nivelman yöntemi kullanılır. Hassas geometrik nivelman yönteminin uygulanması için çalışma alanı dışında iki adet referans noktası belirlenir. Bu noktalardan yapılan milimetre hassasiyetinde ölçülerle yükseklik farkları belirlenir.

b) Yatay Yöndeki Deformasyonlar

Yatay yöndeki deformasyon kayma veya dönme şeklinde görülür. Yatay yöndeki deformasyonların tespiti için bir nirengi ağı oluşturulur. Bu nirengi ağı, jeodezik ağı oluşturan ölçme noktaları, deformasyonu belirlenecek yapı üzerinde uygun yerlere yerleştirilen obje noktaları, deformasyon ölçümü yapılacak yapının dışında sağlam bir zemin üzerine tesis edilen yöneltme noktaları ve deformasyonun yönünü ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılan sigorta noktalarından oluşur.

Yatay yöndeki deformasyonlar hassas poligon yöntemi veya aliyman yöntemlerinden biriyle belirlenebilir.

Yüksek hassasiyet istenen işlerde hassas poligon yöntemi uygulanır. Hem açı hem de uzaklık ölçüsü yapılır. Baraj kreti boyunca poligon güzergahı tesis edilir. Güzergahın başangıç ve bitim noktaları baraj gövdesinin dışında sağlam kayalar üzerine pilye taşı olarak tehsis edilir [10].

Yatay yöndeki deformasyonu belirlemek için kullanılan diğer bir yöntem aliyman metodudur. Bu yöntem noktaların belli bir doğrultuya göre kayma miktarlarının belirli zaman aralıklarında yapılan ölçülere göre incelenmesini kapsar. Aliyman yönteminde, direkt ve açı metodu olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

Direkt yöntemde kret üzerindeki obje noktalarının aliyman doğrultusuna olan uzaklıkları, obje noktasına yerleştirilen işaretler üzerinde doğrudan ölçülür. Herhangi bir hesaplama işlemine gerek yoktur.

Bir diğer yöntem ise açı yöntemidir. Bu yöntemde obje noktalarının aliyman doğrultusuna olan uzaklıkları açı ve kenar ölçülerinden dolaylı olarak belirlenir.

2.2. Deformasyon Analizinde Kullanılan Yöntemler

Farklı periyotlarda yapılan ölçüler değerlendirilirken zaman ve büyüklük parametrelerine bağlı olarak, yerdeğiştirmelerin belirlenmesi ve elde edilen yerdeğiştirmelerin yorumlanması işlemine deformasyon analizi denir [13].

Deformasyon ölçülerinin yorumlanmasında geçmişten günümüze kadar bir çok deformasyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz yöntemleri, pratikliği, kullanım kolaylığı, ağın yapısı, ölçme planı vb. sebeplerden dolayı farklılıklar yada benzerlikler gösterirler. Kullanılan deformasyon analiz yöntemlerinden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1. Bağlı Güven Elipsleri Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Bu yöntemde yapılan deformasyon ölçüleri ölçü tarihlerine göre gruplandırılır. Her grup kendi içinde serbest dengelenir. Uyuşumsuz ölçü değerleri ayıklanır. Jeodezik ağdaki ölçüler ayrı birer ağ ölçüsü gibi düşünöldüğünden datumları birbirinden farklı olur. Bu nedenle birinci grup ve ikinci grup ölçülere ilişkin sonuçlar birbirleriyle doğrudan karşılaştırılmazlar. İki farklı gruptaki ölçüleri birbiri ile ilişkilendirmek için farklı zaman aralığında konumu değişmemiş ortak noktalar kullanılır. Konumlarının değişmeyeceği düşünölen ortak noktalara istatistik testler uygulanarak sabit kalıp kalmadıkları tespit edilir. Sabit noktalar belirlendikten sonra gruplandırılan ölçülerin dengelemesi sonucu elde edilen fark vektörü ve bunun ters ağırlık matrisi yardımıyla noktalardaki deformasyonların anlamlı olup olmadığının irdelenmesi analitik ya da grafik olarak yapılmaktadır [14].

2.2.2. S Transformasyon Yöntemi ile Deformasyon Analizi

1950’li yıllarda W. Baarda tarafından geliştirilmiştir. Değişik zamanlarda, değişik amaçlar için oluşturulan jeodezik kontrol ağlarının datumları çeşitli nedenlerle farklı olabilmektedir. Oluşturulan ağların deformasyon analizinin yapılabilmesi ve duyarlıklarının karşılaştırılabilmesi için, karşılaştırılacak olan parametrelerin aynı datumda belirlenmiş olması gerekir. S transformasyonu ile yeni bir dengelemeye gerek

kalmadan bir datumda belirlenmiş olan bilinmeyen parametreleri, örneğin nokta koordinatları ve bunların kofaktörler matrisi, başka bir datuma dönüştürülebilmektedir.

S transformasyonu ağ noktalarının tamamının veya bir kısmının küçültülmüş koordinat bilinmeyenlerinin kareleri toplamının minimum olması koşulunu öngören serbest dengeleme ile aynı anlamdadır.

S transformasyonu, deformasyon ölçülerinin analizinde, duyarlık açısından ağların karşılaştırılmasında, kontrol ağının beklenen doğruluğu sağlayıp sağlamadığının kontrolünde, koordinat bilinmeyenlerinin varyans-kovaryans matrisinin öngörülen ve ölçüt matrisi adı verilen yapay kovaryans matrisi ile karşılaştırılmasında kullanılır [15].

2.2.3. Kinematik Model Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Kinematik model yönteminin amacı, deformasyona neden olan dış etmenleri dikkate almaksızın zamana bağlı fonksiyonlar yardımıyla nokta hareketlerinin uygun bir tanımını bulmaktır. Bu model deformasyonlar sonucu oluşan yer değiştirmelerin yanı sıra hareket hızlarının ve ivmelerinin de belirlenmesini sağlar.

Kinematik modelde, jeodezik ağda zamanla hareket eden noktalar, hareketin büyüklüğü, hareketin hızı ve ivmesi zamana bağlı bir fonksiyonla saptanır. Hareketin yorumlanması için özellikle ivmenin işareti çok önemlidir. Çünkü deformasyonun nasıl olacağı ivmenin büyüklüğüne göre anlaşılır [16].

2.2.4. Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Kalman Filtreleme Yöntemi, Rudolf Emil Kalman tarafından 1960 yılında ortaya konmuştur. Daha az ölçü periyodu ile ölçü noktalarına ait düzgün ve düzgün olmayan hareket parametreleri hesaplanabilmektedir. Periyodik ölçüler aralarında ilişkilendirilerek, önceki periyodun davranışları ile sonraki periyodun davranışları hesaplanır. Kalman Filtreleme Yöntemi, prediksyon (prediction, ekstrapolasyon), süzme (filtering) ve yumuşatma (smoothing) olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır [16].

2.2.5. Teta Kare (θ^2) Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Deformasyon ölçümleri sonucu elde edilen iki ölçü periyodunun birlikte dengelenmesiyle bulunan fark vektörü, ters ağırlık matrisi ve serbestlik derecesiyle birim ağırlıklı ölçünün öncül varyansı (θ^2) hesaplanır. Daha sonra her bir periyodun ayrı ayrı serbest dengelenmesinden elde edilen varyansların birleştirilmesi ile ortalama varyansı (m^2) bulunur. Sıfır hipotezi olarak, $\theta^2 = m^2$ seçilir.

Test büyüklüğü hesaplanarak, F testine (Fisher Testi) göre karşılaştırılır. Sıfır hipotezi reddedildiğinde ağda deformasyon olduğu söylenebilir [16].

2.2.6. Deformasyon Ölçülerinin Dengelenmesi

Belirli periyotlarla yapılmış deformasyon ölçülerinin karşılaştırılması için her periyot kendi içerisinde değerlendirilerek uyumsuz ölçülerin belirlenmesi gerekir. Bu yaklaşım, Gauss Markoff Modeline dayandırılır ve bazı test kurallarına göre, daha önceden belirlenmiş kriterler ile çelişen düzeltme değerlerinin belirlenmesi ile yapılır. Belirlenen kaba hatalı ölçüler, ya kümeden çıkarılır, ya yeniden ölçülür yada ağırlığına müdahale edilerek etkisi azaltılır [26].

Kaba hatalı ölçülerin etkisini azaltmak için ölçülerin dengelenmesi gerekir. Dengeleme yapmak için yapılan ölçüler aşağıdaki kritere tabi tutulur ve dengeleme kararı bu kritere göre verilir.

n : Ölçü sayısı

u : Bilinmeyen sayısı

d : Datum parametresi (Datum parametresi; tek boyutlu ölçülerde 1, iki boyutlu ölçülerde 2, üç boyutlu ölçülerde 3 değerlerini alır)

f : Fazla ölçü

olmak üzere;

$$f = n - u + d$$

Fazla ölçü sayısına göre;

- $f > 0$ veya $n > u$ ise fazla ölçü var $\rightarrow$ Dengeleme yapılmalı
- $f = 0$ veya $n = u$ ise yeteri kadar ölçü var $\rightarrow$ Tek anlamlı çözüm
- $f < 0$ veya $n < u$ ise yeterli ölçü yok $\rightarrow$ İteratif çözüm [27].

Yapılan çalışmada bilinmeyen sayısı ölçü sayısına eşit olduğu için tek anlamlı çözüm yoluna gidilmiştir. Yapılan ölçülerin hata oranları denklem (2.16)'ya göre bulunmuştur.

2.2.7. Gri Sistem Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Gri Sistem teorisi ilk olarak 1980'li yılların başında ortaya çıkmıştır. Gri Sistem teorisi, belirsizliğin sayılaştırılmasına alternatif bir metottur. Ortaya çıkışındaki temel düşünce stokastik veya bulanık yöntemlerle üstesinden gelinemeyen belirsiz sistemlerin davranışlarını, sınırlı sayıda veri yardımı ile tahmin etmektir [17].

Sosyal, ekonomik, endüstriyel, tarımsal, biyolojik sistemler gibi pek çok sistem ismini ilgili olduğu alandan alır. Gri Sistem ismi ise, incelenen konuya ait bilgi düzeyi esas alınarak seçilmiştir [18]. Gri Sistem teorisinde, belirsizliğin olmadığı kusursuz bilgiye sahip olan bir sistem beyaz renk ile sembolize edilmiştir. Tam zıt özelliklere sahip olan sistem ise siyah olarak nitelendirilmiştir. Yalnızca kısmi bilgiye sahip olunan sistemler ise "Gri Sistemler" olarak isimlendirilmiştir [19].

Çoğu zaman tam olmayan, eksik bilgi ve varsayımlar altında modeller kurulur ve kararlar verilir. Hayattaki başımıza gelen olayların, karşılaştığımız problemlerin, tasarladığımız veya kendiliğinden gelişen süreçlerin çoğunluğu hiçbir zaman ne tam siyah ne de tam beyazdır. Örneğin inşaat sektöründe tesis edilecek yapı bünyesinde yer alan kumun, demirin ve çimento kalitesi gibi faktörler tümüyle bilinse bile, doğa koşulları, işçilik kalitesi gibi pek çok belirsizlik nedeniyle yapının sağlamlığını ve ömrünü tam olarak belirlemek mümkün değildir. Gri Sistem teorisinin ortaya çıkış felsefesi de bu fikirlere dayanmaktadır.

Gri Sistem teorisinin temel karakteristiği, elde mevcut sınırlı miktardaki bilgiyi en iyi şekilde kullanabilme özelliğidir. Gri Sistem teorisini geleneksel yöntemlerden ayıran temel özelliği belirsiz sistemlerin davranışlarını tahmin edebilmek için oldukça sınırlı sayıda veriye ihtiyaç duymasıdır. Minimum miktardaki bilgi Gri Sistem teorisinin gücünü gösterebildiği en uygun ortamdır. Elde edilebilecek bilgi miktarı gri ve gri olmayanı birbirinden ayırt etmekte kullanılan temel ölçüttür [20].

Gri Sistem, ortaya atıldığı ilk günden bu güne kadar pek çok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Gri Sistem teorisi ekonomik, endüstriyel, sosyal, eğitim ve daha bir çok alanda başarı ile uygulanmıştır.

Gri Sistem teorisi temel olarak sistemler arasındaki ilişkinin analizi, model kurulması, tahmin ve karar problemlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir [21].

Gri Sistem, belirsizliğin ve bilgi yetersizliğinin olduğu durumlarda, durumsal analiz, tahmin ve karar verme ile sistemin anlaşılması ve yorumlanabilmesi üzerine kurulmuştur [21].

2.2.8. Gri Sistemle Deformasyon Tahmini

Gri tahmin yöntemi, sistem davranışları hakkında yeterli veriye sahip olmadığımız durumlarda, kabul edilebilir sonuçların üretildiği bir yöntemdir. Uygulama kısmında ise yukarıda bahsedilen gri model çeşitlerinden en çok kullanılan GM(1,1) ve GM(1,N) tahmin modellerini, Keban Barajı'ndaki jeoteknik (fiziksel) deformasyon ölçü yöntemi ile yapılan deformasyon ölçülerinin analizinde kullanıldı.

a) GM(1,1) Tahmin Modeli

Gri Sistem belirsizliğin ve veri yetersizliğinin olduğu durumlarda, durumsal analiz, karar verme ve tahmin yapabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Söz konusu sistemin tek değişkenli ve türevlenebilir modellemesi olan GM(1,1) tahmin modeli doğrusal davranış gösteren bir sistemdir. Referans alınan verilerin davranışlarına göre doğrusal artan veya doğrusal azalan bir grafik oluşturur.

GM (1,1) tahmin modelinin matematiksel ifade şekli aşağıda özetlenmiştir.

$X^{(0)}$ ham veri setinin oluşturulması.

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)) \quad x^{(0)}(k) \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

Toplam üretim operatörü kullanarak $X^{(1)}$ 'i oluşturulması.

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad (i= 1, 2, \dots, n) \quad (2.2)$$

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (2.3)$$

Birinci dereceden ortalama değer üretim operatörü kullanılarak $Z^{(1)}$ 'i oluşturulması.

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

$$Z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), z^{(1)}(4), \dots, z^{(1)}(n)) \quad (2.5)$$

a ve b parametre değerleri tahmin edilmesi.

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (2.6)$$

Parametre değerlerinin tahmin edilmesi

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$$

$$x^{(0)}(2) + az^{(1)}(2) = b \quad (2.7)$$

$$x^{(0)}(3) + az^{(1)}(3) = b$$

.....

$$x^{(0)}(n) + az^{(1)}(n) = b$$

Denklemlerinin matris formu,

$$Y = B \hat{a}$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ -Z^{(1)}(4) & 1 \\ \dots & 1 \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ x^{(0)}(4) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

GM (1,1)'in parametre değerlerine karşılık gelen $\hat{a}$ vektörünü elde edebilmek için sırası ile aşağıda tanımlanan matris işlemleri gerçekleştirilir.

$$Y = B \hat{a} \quad (2.9)$$

$$B^T Y = B^T B \hat{a} \quad (2.10)$$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (2.11)$$

Tahmin modeli elde edilir

$$\frac{dx^{(1)}(k)}{dk} + ax^{(1)}(k) = b \quad (2.12)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(0)}(1))e^{-ak} + \frac{b}{a}(1-e^{-ak}) \quad (2.13)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1-e^{-a})[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} \quad (2.14)$$

Orijinal veri setinin herhangi bir k elemanı için tahmin hatası $\varepsilon^{(0)}(k)$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\varepsilon^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k = 1, 2, \dots, n \quad (2.15)$$

Orijinal veri setinin herhangi bir k elemanı için hata oranı $\delta^{(0)}(k)$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\delta^{(0)}(k) = \left(\frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \right) \times 100\%, k=2, 3, \dots, n \quad (2.16)$$

Tahmin modelinin doğruluğu aşağıda tanımlanan P parametresi ile belirlenir.

$$p = \frac{\sum_{k=2}^n (1 - |\delta^{(0)}(k)|)}{n-1} \quad (2.17)$$

Tahmin edilen verinin hata ortalaması ve hata kareleri ortalaması sırasıyla ξ ve S_1 simgeleriyle gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\xi = \frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon^{(0)}(k)}{n} \quad (2.18)$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (\varepsilon^{(0)}(k) - \xi)^2}{n}} \quad (2.19)$$

Gözlemlenen verinin ortalaması ve hata kareleri ortalaması sırasıyla m ve S_2 simgeleriyle gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$m = \frac{\sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)}{n} \quad (2.20)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - m)^2}{n}} \quad (2.21)$$

Tahmin modelinin hata oranını veren parametre değeri C ile gösterilir ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır:

$$C = \frac{S_1}{S_2} \quad (2.22)$$

Tahmin modeli için iki belirleyici ölçüt olan P ve C parametrelerinin aldıkları değerlere göre tahmin modellerinin sınıflandırılması Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Tahmin modelinin doğruluk sınıflandırılması [23].

SINIFLANDIRMA	PARAMETRELER	
	P	C
İYİ	>0.95	< 0.35
YETERLİ	> 0.80	< 0.50
SINIRDA	> 0.70	< 0.65
YETERSİZ	≤0.70	≥0.65

b) GM (1,N)

N adet değişkene sahip birinci dereceden türevlenebilir eşitliklerin yer aldığı model türüdür. Genellikle dinamik faktör analizi amaçlı kullanılır. Farklı değişkenlerin davranışlarına göre tahmin değerleri elde edilir. Değişkenlerin ortak davranışları tahmin değerlerinin şekillenmesinde oldukça etkilidir. Bu model türü (N-1) adet bağımsız değişken ve bir bağımlı değişken içerir. Çok değişkenli (Multi-Variable Grey Model)

MGM (1,N) model, birikimli üretim operatörü (Accumulating Geneation Operator (AGO)) ile kurulur. Başlangıç verileri, AGO ile raslantısal ve değişken özellikte verilere dönüştürülür.

$$X_i^{(0)} = (x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), x_i^{(0)}(3), \dots, x_i^{(0)}(n)), i = 2, 3, \dots, N \quad (2.23)$$
$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(m)) \quad (2.24)$$

Değişken sayısı n ve gözlem periyodu m olduğu varsayılırsa, MGM(1,N) işlemi aşağıdaki gibi tanımlanır.

.....

18

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (2.28)$$

Denklemde yer alan parametrelerin matris gösterimi aşağıdaki gibidir;

$$B = \begin{bmatrix} \bar{x}_1^{(1)}(2) & \bar{x}_2^{(1)}(2) & \dots & \bar{x}_n^{(1)}(2) & 1 \\ \bar{x}_1^{(1)}(3) & \bar{x}_2^{(1)}(3) & \dots & \bar{x}_n^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_1^{(1)}(m) & \bar{x}_2^{(1)}(m) & \dots & \bar{x}_n^{(1)}(m) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) & x_2^{(0)}(2) & \dots & x_n^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) & x_2^{(0)}(3) & \dots & x_n^{(0)}(3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(0)}(m) & x_2^{(0)}(m) & \dots & x_n^{(0)}(m) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\bar{x}_i^1(k) = \frac{1}{2} (x_i^{(1)}(k) + x_i^{(1)}(k-1)) \quad (2.31)$$

$\hat{a}$ matrisi ile $\hat{A}$ ve $\hat{B}$ tahmin değerleri elde edilebilir.

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{21} & \dots & \hat{a}_{n1} \\ \hat{a}_{12} & \hat{a}_{22} & \dots & \hat{a}_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{a}_{1m} & \hat{a}_{2m} & \dots & \hat{a}_{nm} \end{bmatrix}, \hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \\ \dots \\ \hat{b}_n \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Böylece, aşağıdaki denklemler yardımıyla, birinci derece ters birikimli üretim operatörü elde edilir.

$$\hat{X}^{(1)}(k) = e^{\hat{A}^{(k-1)}} (\hat{X}^{(1)}(1) + \hat{A}^{(-1)} \hat{B}) - \hat{A}^{(-1)} \hat{B} \quad (2.33)$$

$$e^{\hat{A}^{(k-1)}} = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\hat{A}^i}{i!} (k-1)^i \quad (2.34)$$

$$\hat{X}^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1) \quad (2.35)$$

Tahmin değerinin hata miktarı,

$$v_i k = x_i^{(0)}(k) - \hat{x}_i^{(0)}(k), \quad V_i = (v_i(1), v_i(2), \dots, v_i(m))^T \quad (2.36)$$

Tahmin modelinin ortalama doğruluğu σ^2 bulunur [24].

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^T V_i}{nm} \quad (2.37)$$

Jeoteknik ölçü yöntemi ile deformasyon değerleri GM(1,N) tahmin modeli ile tahmin edilirken, barajın kil dolgu üzerindeki piyezometre ölçüm aletlerinin tespit ettiği değerler kullanılmıştır. Bu değerler, GM(1,N) tahmin modelinin Matlab ortamında hazırlanan, deformasyon analizi yazılım paketi haline getirilmiş program ile tahmin edilmiştir.

2.3. Matlab Ortamında Hazırlanan Yazılım

Matlab, temel olarak nümerik hesaplama, grafiksel veri gösterimi ve programlamayı içeren teknik ve bilimsel hesaplamalar için yazılmış yüksek performansa sahip bir yazılımdır. MATLAB adı, *MATrix LABoratory (Matrix Laboratuvarı)* kelimelerinin başındaki kısaltmalardan oluşturulmuştur. Matlab, ilk olarak Fortran Linpack ve Eispack projeleriyle geliştirilen ve bu programlara daha etkin ve kolay erişim sağlamak amacıyla 1970'lerin sonlarında yazılmıştır. İlk başlarda bilim adamlarına problemlerin çözümüne matris temelli teknikleri kullanarak yardımcı olmaktaydı. Bugün ise geliştirilen yerleşik kütüphanesi ve uygulama ve programlama özellikleri ile gerek üniversite ortamında (başta matematik ve mühendislik olmak üzere tüm bilim dallarında) gerekse sanayi çevresinde yüksek verimli araştırma, geliştirme ve analiz aracı olarak yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca işaret işleme, kontrol, fuzzy, sinir ağları, wavelet analiz gibi bir çok alanda ortaya koyduğu Toolbox adı verilen yardımcı alt programlarla da özelleştirilmiş ve kolaylaştırılmış imkanlar sağlanmaktadır

Matlab, komut temelli bir programdır. Matlabın açık mimari yapısı ve kullanım kolaylığı, yapay sinir ağlarından güç sistemleri analizine, görüntü işlemeden finansal modelleme araçlarına, kontrol sistemlerinden veri tabanı uygulamalarına ve daha bir çok alanlara yönelik özel ürünleri ile kullanıcı problemlerini en hızlı ve kolay yoldan çözebilme imkanı tanımıştır [25].

Bu kadar kullanım alanına sahip Matlab ortamı çalışmamızın yazılım ayağını oluşturmaktadır. Yapılan çalışmada Gri Sistem teorisine ait matematiksel ifadeler Matlab yazılım diline çevrilmiş ve bir yazılım programı haline getirilmiştir.

Bunun için $X^{(0)}$ ham verisi “.dat” Matlab veri dosyası halinde yazılımın giriş verisini oluşturmuştur. Yazılım, giriş verisini kullanarak toplam üretim oparetörünü elde etmektedir. Toplam üretim oparetörü yardımıyla ortalama değer oparetörü elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak a ve b parametreleri oluşturulmuştur. Parametre değerleri tahmin modellerini, tahmin modelleri ise tahmin değerini oluşturmuştur.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Büyük mühendislik yapıları izleme çalışmaları, yapının inşaat aşamasından itibaren başlar ve yaşamları boyunca devam eder. Yapılan ölçülerle, yapıların hareketleri hakkında deformasyon analizleri yapılır. Deformasyon analizleri, verilerin veya sonuçların yorumlanmasının en önemli ve en son aşamasıdır. Geri dönülemez felaketlerin ve yanlış kararların önüne geçilebilmesi açısından, analiz sonuçlarının güvenilir olması çok önemlidir. Yapıların hareketleri hakkında güvenilir sonuçlar almak için çok sayıda ölçüye ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada bir barajdaki deformasyonun, sınırlı sayıda yapılan ölçü ile tespit edilmesinde Gri Sistem Teorisi kullanılmıştır. Deformasyon ölçmeleri, uzun ve maliyetli olmasının yanı sıra gerekli bir ölçüm şeklidir. Bu nedenle hayati önem taşıyan büyük yapıların dışında, mühendislik yapılarının tamamında düzenli olarak deformasyon ölçüleri ve deformasyon gözlemleri yapılmalıdır. Ancak, barajlar ve köprülerin dışında, diğer yapılarda deformasyon ölçümlerine pek rastlanmamaktadır.

Çalışmamızda, Keban Barajı'nda jeoteknik ölçü aletleriyle tespit edilen boşluk suyu basınç miktarı ve baraj göledeki su kotunun, 2010 yılından 2015 yıllarına kadar olan ölçü değerleri kullanılmıştır. Gri modelin tek değişkenli tahmin modeli $GM(1,1)$ ve çok değişkenli tahmin modeli $GM(1,N)$ kullanılarak baraj kretindeki boşluk suyu basınç değerleri ile baraj gölündeki su miktarı 2023 yılına kadar tahmin edilmiştir. Tahmin değerleri elde edilirken 2010-2015 yılları arasındaki ölçülen değerler, referans verisi olarak kullanılmıştır. Referans verileri kullanılarak tahmin edilen değerler ile 2023 yılına kadar olması beklenen deformasyon değerleri tahmin edilmiştir. Böylece Gri Sistemin deformasyon tahminindeki kullanılabilirliği test edilmiştir.

3.1. Çalışma alanı

Keban Barajı, Elazığ'ın 45 km kuzeybatısında, Malatya'nın 65 km kuzeydoğusunda olup, Karasu ve Murat Nehirlerinin birleştiği yerden 10 km daha aşağıda nehrin aktığı en dar boğazlarından birindedir. Karasu ile Murat Nehirlerinin birleşmeleri ile meydana gelen Fırat Nehri'nin bu birleşme noktasından itibaren ilk uygun baraj yeridir.

Keban Barajı'nın gövde yüksekliği 210 m göl derinliği ise maksimum 160 metredir. Elektrik enerjisi üretmek amacıyla 1974 yılında yapılmıştır. Maksimum seviye 845, minimum işletme kotu 813 m normal göl hacmi 31 milyar m³, ölü göl hacmi 14 milyar m³, faydalı su miktarı 16,9 milyar m³'tür (Şekil 3.1). Baraj çıkışında Fırat Nehri'nin yatağı 692 metredir. Yıllık ortalama üretim ilk dört ünite için 4.8 milyar kwh, biri yedek olmak üzere diğer üç ünite ile yaklaşık 6.5 milyar kwh'tır. Göl havzası 64 100 km², maksimum gölalanı 681 km²'dir [28].

Fırat Nehri yılın muhtelif zamanlarında çok farklı bir akım düzenine sahiptir. Ortalama geçen su miktarı 635 m³/sn dir. Kış aylarında ortalama debi 200 ile 300 m³/sn arasında değişir. Nehrin bir yıl içinde geçirdiği suyun % 70'i kar erime mevsiminde yani Mart ile Haziran ayları arasında geçer [29].



Şekil 3.1. Keban Barajı [29].

Keban Barajı karstik morfolojiye sahip bir boğaz üzerine inşa edilmiştir. Baraj inşaat ve rezervuar alanında, yapıyı mermerler ve kalsistler oluşturmaktadır. Mermerler, farklı doğrultularda çatlaklı ve faylı yapıda olup yoğun bir şekilde karstlaşmaya uğramıştır. Bu nedenle çatlaklı ve faylı olan mermerler, mağaralar, yeraltı su yolları ve travertenlerden oluşan paleokarstik şekiller içermektedir. Temelde bulunan kalsistler geçirimsiz özellikte, üstteki mermerler ise geçirimlidir. Bu özellikler mermerleri birbiriyle bağlantılı, her yönde su taşımaya uygun, etkili porozitesi yüksek bir ortam haline getirmiştir [28].

3.2. Bulgular

Toprak ve kaya dolgu barajların önemli problemlerinden birisi çevresi, temeli ve gövdesinde yer alan boşluk suyu miktarıdır. Geçirimsiz zeminlerde hızlı yüklemeler, boşluk suyu basıncını düşmesine imkân vermeden aşırı artışlar meydana getirerek, baraj gövde veya çevresinde göçmelere ve istenmeyen deformasyonlara sebep olmaktadır. Baraj rezervuarının doldurulmasıyla gövdedeki boşluk suyu basıncının toplam basınçtan fazla olmasıyla hidrolik çatlamalar meydana gelmektedir. Buna en iyi örnek Fortenelle Barajı'dır. Bu baraj Amerika'da Wyoming bölgesinde Green River üzerinde bulunmaktadır. 1961 yılında inşaatına başlanan ve 1964 yılında tamamlanan barajın, 3 Eylül 1965 tarihinde gövdenin sağ tarafında ıslak bir nokta ve sonrasında sızıntı olduğu görülmüştür. Zayıflama sonucunda gövdenin mansap şevinde 7660 m³ lük dolgu malzemesi sızma ile birlikte gövdeden taşınmıştır [30]. Zamanında alınan tedbirler sayesinde barajın güvenliği sağlanarak olası bir facianın önüne geçilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Fontenelle Barajı'nda sızma sonucunda gövdede yıkılma.

Çalışmamızda, benzer problemlerin yaşanma olasılığına sahip, jeolojik yapısı nedeniyle sızıntı veya boşluk suyu rejiminin önemli bir sorun olduğu Keban Barajı ele alınmıştır. Barajın su tutmaya başladığı tarihten itibaren jeodezik ve jeoteknik (fiziksel)

yöntemlerle sızıntı ve kaçak su miktarının tespit edilmesi için deformasyon ölçümleri ve analizleri yapılmıştır. Yapılan ölçüm ve analiz değerleri DSİ personeline kayıt altına alınmıştır. DSİ arşivlerinden yararlanılarak elde edilen ölçüm değerleri referans verisi olarak kullanılmıştır. Kullanılan referans verileri, Gri Sistemle tahmin yapabilmek için başlangıç verisi kabul edilmiştir. Bu amaçla, Keban Barajı'nın 2010 yılından 2015 yıllarına kadar geçen süre içerisinde değişen su seviyesini ve kil dolgu kısmında yer alan piyezometrelerin tespit ettiği boşluk suyu basınç değerleri çalışmamızda $X_{(0)}$ başlangıç verisi olarak anılacaktır.

Barajın kil dolgu kısmındaki piyezometrelerin okuduğu boşluk suyu basınç değerleri Gri Sistemin çok değişkenli GM(1,N) model türüyle tahmin edilmiştir. Tahmin değerleri elde edilirken değişken olarak piyezometrelerin rakamsal isimleri (P5, P13 ve P19) ile su kotu değerleri kullanılmıştır. Piyezometreler tercih edilirken baraj kretine yerleştirildikleri piyezometre uç kotlar dikkate alınmıştır. Uç kotu en düşük olan 19 numaralı piyezometre (P19) baraj kretinin 720.00 metresinde yer alırken, kotu en büyük olan yani yüzeye en yakın kotta bulunan 13 numaralı (P13) piyezometrenin uç kotu 810.00 metredir. 5 numaralı piyezometrenin uç kotu ise (P5) baraj kretinin 730.00 metresinde yer almaktadır. Baraj kreti üzerinde onlarca piyezometre bulunduğu halde, seçilen piyezometreler baraj kretinin en alt, en yüksek ve orta kısmında yer alan ve düzenli olarak ölçümleri kayıt altına alınmış değerlere sahip olan piyezometreler arasında seçilmiştir.

Seçilen piyezometrelere ait ölçüm değerleri tahmin değerlerini elde etmek için kullanılmıştır. Gri Sistem ile tahmin değerlerini hesaplayabilmek için tahmin modellerinin matematiksel ifade şekli, Matlab ortamında hazırlanan bir yazılım oluşturulmuştur. Bu yazılım paketine, “.dat” dosyası olarak hazırlanmış referans verilerini, giriş verisi olarak kullanmıştır. Giriş verisinde Keban Barajı'na ait piyezometre ölçüm aletlerinin okuduğu boşluk suyu basınç değerler ile su miktarının, 2010 yılından itibaren ölçtüğü ilk altı ölçüm değeri yer almaktadır. Matlab ortamında hazırlanan yazılım, bu verilerin değişim miktarlarını kullanarak piyezometrelerin okuduğu boşluk suyu basınç değerlerini ve su kotu değerlerini yeniden tahmin etmiştir. Tahmin edilen değerler tablo haline getirilmiştir.

Tahmin edilen tablo değerleri ile deformasyon yorumu yapılmıştır. Deformasyon varlığından söz edebilmek için piyezometrelerin okuduğu boşluk suyu basınç değerlerinin yerçekimi katsayısına ($9,81\text{gr/cm}^2$) bölünmesiyle elde edilen değerden

yararlanılmıştır. Piyezometrenin hücre kotuna, tahmin edilen boşluk suyu değerinin eklenmesiyle bulunan sonuç, membaa tarafında yer alan su kotu değerinden büyük olması durumunda deformasyonun olduğunun göstergesidir.

Tablo 3.1. Su kotuna ait ölç ve tahmin değerleri.

Yıllar	Su Kotu	
	Ölçülen Değer (metre)	GM(1,1)
2010	834.110	834.110
2011	840.100	839.848
2012	837.270	837.918
2013	838.440	835.993
2014	830.110	834.072
2015	834.070	832.156
2016	840.360	830.244
2017	834.700	828.337
2018	833.524	826.434
2019	Tahmin Değeri	824.535
2020	Tahmin Değeri	822.641
2021	Tahmin Değeri	820.751
2022	Tahmin Değeri	818.865
2023	Tahmin Değeri	816.983

Gri Sistem modelinin tek değişkenli tahmin modeli olan GM(1,1) yöntemiyle yapılan Keban Barajı'ndaki su kotu seviyesine ait tahmin değerleri ve ölçülen değerler Tablo 3.1'de yer almaktadır. Tablo 3.1'de yer alan tahmin değerlerinin doğruluğunun ($P=0.90$) ve tahmin modelinin hata oranının ($C=0.35$) ise olduğu görülmüştür. Elde edilen bu değerler Tablo 2.1'deki tahmin modelinin doğruluk sınıflandırması değerlerine göre kıyaslandığında tahmin modelinin doğruluğunun yeterli, tahmin modelinin hata oranının ise iyi olarak nitelendirilen sınırlar içerisinde yer aldığı görülmüştür.

Tabloda yer alan değerlerden koyu renk ile ifade edilenler yıllık ölçülen değerlerdir. Tahmin değerleri olarak nitelendirilen değerler ise gri model kullanılarak elde edilen değerlerdir. Elde edilen değerler gelecek yıllara ait deformasyon tahmininde kullanılmaktadır.

Tablo 3.1'de yer alan GM(1,1) tahmin değerleri ilk tahmin değerinden sonra doğrusal olarak azalmıştır. Ancak ölçülen gerçek su kotu seviyesi, yağış rejimine bağlı olarak 2011, 2013, 2015 yıllarında artmış, 2012, 2014 yıllarında azalma göstermiştir.

Tablo 3.1’de yer alan 2016 yılına ait su kotu tahmin değeri 830.244 m iken, DSİ personeline ölçülen değer 840.360 metredir. Aynı şekilde 2017 yılı için tahmin edilen değer 828.337 m iken, ölçülen değer 834.700 metredir. Benzer şekilde 2018 yılı için tahmin edilen değer 826.434 m, barajda ölçülen su kotu değeri 833.524 metredir.

Yağış miktarındaki ve dolayısıyla su kotu seviyesindeki değişim miktarı, tahmin değerlerini gösteren GM(1,1) eğrisinde anlamlı olarak temsil edilememiştir.

Aşağıdaki Tablo 3.2 de yer alan 5 numaralı piyezometreye ait ölçülen boşluk suyu basınç değerleri ile gri modelin tek değişkenli GM(1,1) ve çok değişkenli tahmin modeli GM(1,N) ile elde edilen tahmin değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2. 5 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri.

Yıllar	P5 Nolu Piyezometre				
	Ölçülen Değer (kg/cm ²)	GM(1,1) (P5)	GM(1,2) (P5-P13)	GM(1,3) (P5-P13-P19)	GM(1,4) (P5-P13-P19-Su Kotu)
2010	1350	1350.000	1350.000	1350.000	1350.000
2011	230	301.606	246.289	248.487	253.775
2012	390	332.265	369.401	373.391	357.817
2013	395	366.041	410.356	400.381	427.264
2014	420	403.251	415.169	409.198	381.030
2015	410	444.243	404.489	414.209	417.702
2016	Tahmin Değeri	489.402	387.557	418.042	421.061
2017	Tahmin Değeri	539.152	368.489	421.213	351.452
2018	Tahmin Değeri	593.958	349.099	423.853	509.127
2019	Tahmin Değeri	654.337	330.167	426.024	262.437
2020	Tahmin Değeri	720.852	312.008	427.769	565.395
2021	Tahmin Değeri	794.130	294.736	429.126	287.041
2022	Tahmin Değeri	874.856	278.368	430.131	411.439
2023	Tahmin Değeri	963.789	262.887	430.814	605.305
Hata Oranı		2.227	0.532	0.599	0.475

Gri modelin tek değişkenli tahmin modeli GM(1,1) ve çok değişkenli tahmin modelleri ile elde edilen değerler Tablo 3.2’de yer almaktadır. Tabloda ölçülen değer sütununda yer alan altı değer referans verisi olarak kullanılmıştır. Gri modelin her iki tahmin modeli ile referans verisi olarak kullanılan değerler yardımıyla sonraki yıllara ait boşluk suyu basınç değerleri tahmin edilmiştir.

Tablo 3.2’de son satırında tahmin değerlerinin hata oranları yer almaktadır. Hata oranları incelendiğinde GM(1,1) tahmin değerlerinin hata oranlarının diğer tahmin değerlerine göre fazla çıktığı görülmüştür.

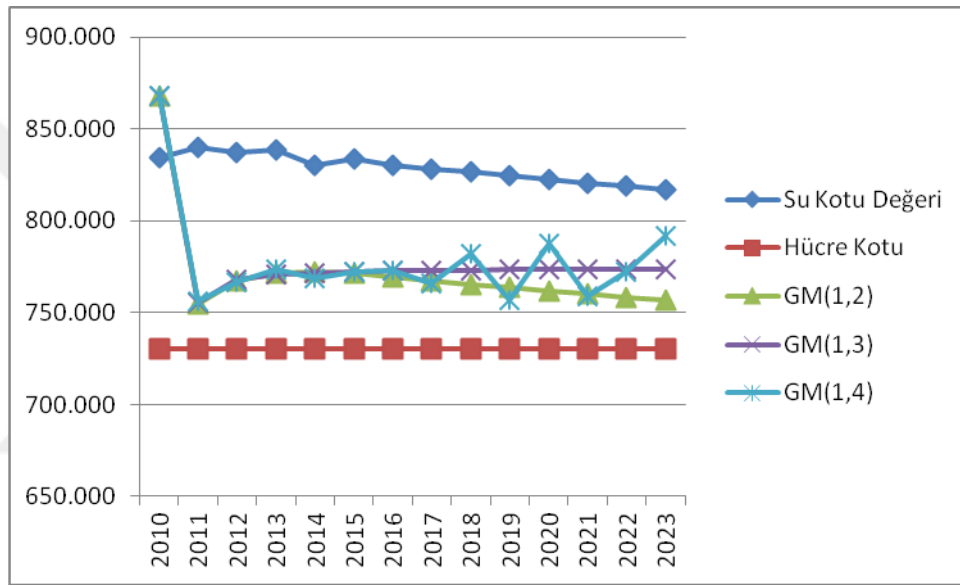
Tablo 3.3’te yer alan değerler, Gri Sistemin GM(1,N) ve GM(1,1) tahmin modelleri ile elde edilmiştir. Tablonun ilk sütununda ölçü yapılan yıllar yer almaktadır. Tablonun ikinci sütununda ise su kotuna ait referans değeri olarak kullanılan değerler ile tahmin edilen değerler gösterilmiştir. Tablonun üçüncü sütununda piyezometrenin bulunduğu kot değeri, sonraki üç sütunda ise piyezometrenin tahmin edilen ölçü değerleri yer almaktadır. Tablonun son üç sütununda ise deformasyon durumu gösterilmektedir.

Tablo 3.3. 5 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu.

Yıllar	P5 Nolu Piyezometre					Deformasyon Tahmini		
	Su Kotu Değeri	Hücre Kotu	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)
2010	834.110	730.000	1350.000	1350.000	1350.000	Var	Var	Var
2011	840.100	730.000	246.289	248.487	253.775	Yok	Yok	Yok
2012	837.270	730.000	369.401	373.391	357.817	Yok	Yok	Yok
2013	838.440	730.000	410.356	400.381	427.264	Yok	Yok	Yok
2014	830.110	730.000	415.169	409.198	381.030	Yok	Yok	Yok
2015	834.070	730.000	404.489	414.209	417.702	Yok	Yok	Yok
2016	830.244	730.000	387.557	418.042	421.061	Yok	Yok	Yok
2017	828.337	730.000	368.489	421.213	351.452	Yok	Yok	Yok
2018	826.434	730.000	349.099	423.853	509.127	Yok	Yok	Yok
2019	824.535	730.000	330.167	426.024	262.437	Yok	Yok	Yok
2020	822.641	730.000	312.008	427.769	565.395	Yok	Yok	Yok
2021	820.751	730.000	294.736	429.126	287.041	Yok	Yok	Yok
2022	818.865	730.000	278.368	430.131	411.439	Yok	Yok	Yok
2023	816.983	730.000	262.887	430.814	605.305	Yok	Yok	Yok

Deformasyonun varlığında söz edebilmek için tahmin edilen değerlerin yer çekim katsayısına bölünmesi ile piyezometrenin bulunduğu yükseklik (Hücre uç kotu) değerinin toplanarak su kotu seviyesinden fazla olup olmadığına göre yorumlanmıştır. Şekil 2.3’te yer alan piyezometre okuma karnesinde, ölçülen değerlerin tabloya yazılış biçimleri ve değerlendirme yöntemlerin kullanılmıştır. Su kotundan büyük olan tahmin değerlerinin bulunduğu yıllarda kritik değerlere yaklaşıldığının ve deformasyon olduğunun göstergesidir.

Tablo 3.3'te yer alan deformasyon durumunu incelediğimizde, 2010 yılına ait değerlerde deformasyonun olduğu görülmektedir. 2010 yılında barajın memba tarafındaki su kotu değeri, 834.11 m iken 5 numaralı piyezometre 1350 kg/cm² değeri okunmuştur. Bu değer yer çekim sabitine bölünmesi ile 5 numaralı piyezometrenin bulunduğu sondaj kuyusundaki su seviyesinin 137.61 metreye karşılık geldiği hesaplanmıştır. Bu değer piyezometrenin bulunduğu 730.00 m değerine eklenmesi ile 867.61 değeri bulunmuştur. Bu değer memba tarafındaki su kotundan büyük olduğundan deformasyonun varlığından söz edilmiştir.



Şekil 3.3. 5 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.

Şekil 3.3'te yer alan grafikte, deformasyon beklentisi daha anlaşılır şekilde görülmektedir. Şekil 3.3'te de, ilk tahmin değeri deformasyonun varlığını göstermektedir. Benzer şekilde 2023 yılında deformasyonun, GM(1,4) tahmin modeline göre kritik seviyeye yaklaşacağının beklendiği görülmektedir.

Tablo 3.4'te 13 numaralı (P13) piyezometre aletine ait referans değerleri ve tahmin değerleri yer almaktadır. Tabloda altı adet ölçülen değer kullanılarak sonraki yıllara ait tahmin değerleri üretilmiştir. Gri Sistemin tek değişkenli ve çok değişkenli tahmin modelleri kullanılarak, 2010 yılından 2023 yılına kadar olan onbir yıllık tahmin değerleri oluşturulmuştur. Tahmin değerleri üretilirken hangi piyezometre aletlerinin birlikte değerlendirildiği tabloda gösterildiği şekildedir.

Tablo 3.4. 13 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri.

Yıllar	P13 Nolu Piyezometre				
	Ölçülen Değer (kg/cm ²)	GM(1,1) (P13)	GM(1,2) (P13-P19)	GM(1,3) (P13-P19-Su Kotu)	GM(1,4) (P13-P19-SuKotu-P5)
2010	280	280.000	280.000	280.000	280.000
2011	386	368.048	378.130	378.190	355.007
2012	284	317.666	306.350	307.151	369.633
2013	304	274.180	262.542	261.326	155.549
2014	200	236.648	235.661	234.035	343.609
2015	230	204.253	219.022	219.998	229.567
2016	Tahmin Değeri	176.293	208.582	215.167	161.779
2017	Tahmin Değeri	152.160	201.894	216.526	517.527
2018	Tahmin Değeri	131.331	197.478	221.891	195.593
2019	Tahmin Değeri	113.353	194.439	229.729	852.534
2020	Tahmin Değeri	97.836	192.234	238.998	356.308
2021	Tahmin Değeri	84.444	190.536	249.021	646.540
2022	Tahmin Değeri	72.884	189.147	259.382	405.161
2023	Tahmin Değeri	62.907	187.946	269.844	773.631
Hata Oranı		0.754	0.875	0.793	7.484

Tablo 3.4'te son sütunda yer alana ve Gri Sistemin çok değişkenli modeli olan GM(1,4) tahmin modeli kullanılarak elde edilen tahmin değerlerinin artan ve azalan şekilde değerler aldığı görölmüştür. Bu durum referans verilerinde görölmemektedir. Bunun sebebinin, birlikte değerlendirilen su kotu ve diğer piyezometre aletlerinin referans ölçülerinin davranışları ile alakalı olduğu düşünölmektedir. Ancak benzer değişkenler diğer piyezometrelerin son sütununda yer alan ve GM(1,4) tahmin modelinde elde edilen tahmin değerlerinde rastlanmamıştır.

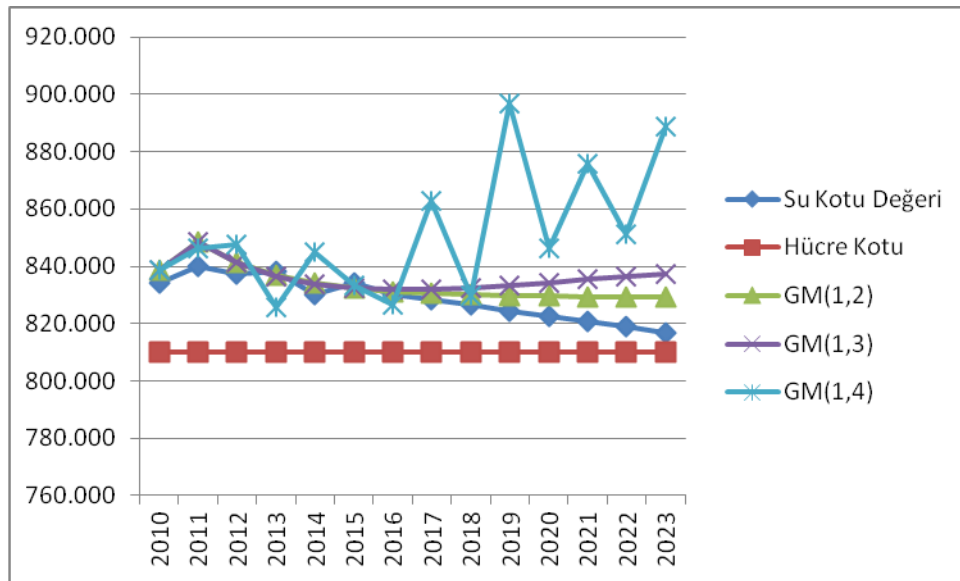
Tablo 3.5'te yer alan değerler, 13 numaralı piyezometre aletine ait deformasyon durumunu göstermektedir. 13 numaralı piyezometre aleti baraj kretinin 810.00 metresine yerleştirilmiştir. Gri sistemin tahmin modelleri yardımı ile elde edilen tahmin değerleri piyezometrenin yerleştirildiği hücre kotuna eklenerek deformasyon olup olmadığı yorumlanmıştır. Tabloda yer alan 13 numaralı piyezometre aletinin su kotuna yakın bir seviyede olması ve gri tahmin modeli ile elde edilen tahmin değerlerinin büyük olması nedeniyle deformasyon değerinin kritik seviyede olduğu anlaşılmaktadır.

Bu durumun referans alınan ölçü değerlerinde de aynı olduğu görölmüştür. Tahmin değerlerinin hata oranları dikkate alındığında GM(1,4) tahmin modelinin hata oranının diğer tahmin modellerine göre fazla olduğu görölmüştür.

Tablo 3.5. 13 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu.

Yıllar	P13 Nolu Piyezometre					Deformasyon Tahmini		
	Su Kotu Değeri	Hücre Kotu	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)
2010	834.110	810.000	280.000	280.000	280.000	Var	Var	Var
2011	840.100	810.000	378.130	378.190	355.007	Var	Var	Var
2012	837.270	810.000	306.350	307.151	369.633	Var	Var	Var
2013	838.440	810.000	262.542	261.326	155.549	Yok	Yok	Yok
2014	830.110	810.000	235.661	234.035	343.609	Var	Var	Var
2015	834.070	810.000	219.022	219.998	229.567	Yok	Yok	Yok
2016	830.244	810.000	208.582	215.167	161.779	Var	Var	Yok
2017	828.337	810.000	201.894	216.526	517.527	Var	Var	Var
2018	826.434	810.000	197.478	221.891	195.593	Var	Var	Var
2019	824.535	810.000	194.439	229.729	852.534	Var	Var	Var
2020	822.641	810.000	192.234	238.998	356.308	Var	Var	Var
2021	820.751	810.000	190.536	249.021	646.540	Var	Var	Var
2022	818.865	810.000	189.147	259.382	405.161	Var	Var	Var
2023	816.983	810.000	187.946	269.844	773.631	Var	Var	Var

13 numaralı piyezometre aletine ait boşluk suyu basınç miktarı ve deformasyon durumu Tablo 3.5’de olduğu gibidir. Tabloda yer alan tahmin değerlerinden birçok yılda deformasyonun olduğu veya deformasyonun kritik seviyeye yaklaştığı ve hatta kritik seviyeyi geçtiği anlaşılmıştır. Bu durum Şekil 3.4’de daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4. 13 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.

Tablo 3.6. 19 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri.

Yıllar	P19 Nolu Piyezometre				
	Ölçülen Değer (kg/cm ²)	GM(1,1) (P19)	GM(1,2) (P19-Su Kotu)	GM(1,3) (P19-Su Kotu-P5)	GM(1,4) (P19-Su Kotu-P5-P13)
2010	820	820.000	820.000	820.000	820.000
2011	822	825.611	822.813	822.934	822.389
2012	830	827.202	829.551	829.556	831.319
2013	832	828.797	831.232	831.000	828.605
2014	830	830.394	830.907	830.837	831.747
2015	830	831.995	829.787	829.929	832.287
2016	Tahmin Değeri	833.599	828.354	828.622	827.222
2017	Tahmin Değeri	835.206	826.799	827.097	839.528
2018	Tahmin Değeri	836.816	825.196	825.450	820.951
2019	Tahmin Değeri	838.429	823.577	823.738	844.327
2020	Tahmin Değeri	840.045	821.953	821.991	823.366
2021	Tahmin Değeri	841.665	820.329	820.226	833.069
2022	Tahmin Değeri	843.287	818.708	818.452	848.198
2023	Tahmin Değeri	844.913	817.089	816.676	797.352
Hata Oranı		0.001	0.006	0.005	0.047

Tabloda 3.6’da yer alan tahmin değerleri ve tahmin değerlerine ait hata oranları incelendiğinde başarılı tahmin değerlerinin üretildiği görülmektedir. 19 numaralı piyezometrenin ölçtüğü boşluk suyu basınç değerine göre herhangi bir yılda meydana gelebilecek bir deformasyon beklentisi bulunmamaktadır.

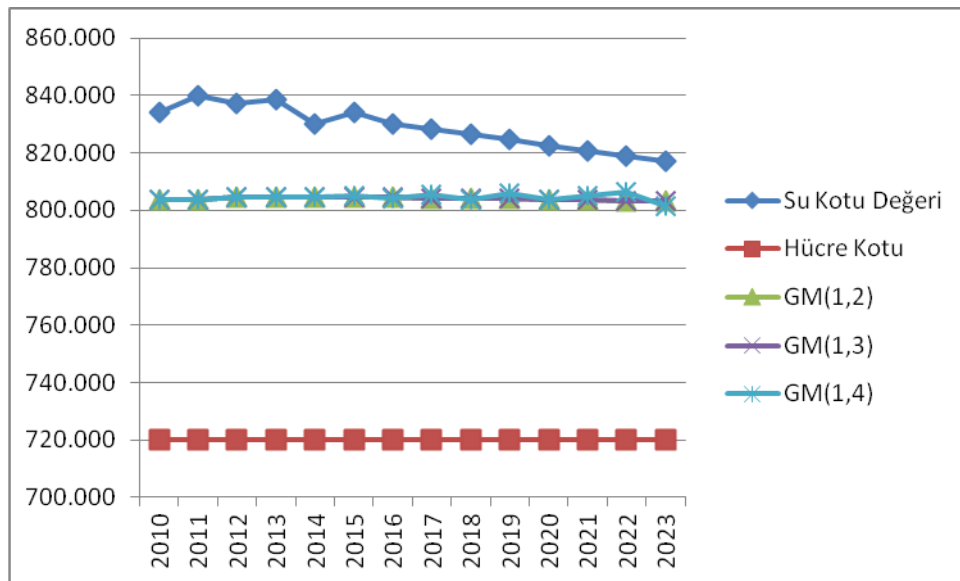
Deformasyon tahmininde kullanılmak üzere ölçülen tahmin değerleri beklenildiği gibi çıkmıştır. Bunun yanı sıra ölçülen altı yıllık su kotuna ait veriler yıllık yağış ve kuraklığa bağlı olarak dalgalı bir artış azalış göstermektedir. 2015 yılından sonraki yıllarda tahmin edilen su kotu seviyesi Gri Sistemin tek değişkenli tahmin modeli olan GM(1,1)’in karakteristik özelliği gereği doğrusal olarak azalmaktadır. Su kotuna ait bu tahmin değerleri mevcut gerçek durumdan farklılık göstermektedir.

Ancak boşluk suyu basınç değerlerinin tahmin gücü oldukça gerçekçi olduğu tablo ve şekilde çok daha iyi anlaşılmaktadır.

Tablo 3.7. 19 Nolu piyezometre aletine ait tahmin değerleri ve deformasyon durumu.

Yıllar	P19 Nolu Piyezometre					Deformasyon Tahmini		
	Su Kotu Değeri	Hücre Kotu	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)	GM(1,2)	GM(1,3)	GM(1,4)
2010	834.110	720.000	820.000	820.000	820.000	Yok	Yok	Yok
2011	840.100	720.000	822.813	822.934	822.389	Yok	Yok	Yok
2012	837.270	720.000	829.551	829.556	831.319	Yok	Yok	Yok
2013	838.440	720.000	831.232	831.000	828.605	Yok	Yok	Yok
2014	830.110	720.000	830.907	830.837	831.747	Yok	Yok	Yok
2015	834.070	720.000	829.787	829.929	832.287	Yok	Yok	Yok
2016	830.244	720.000	828.354	828.622	827.222	Yok	Yok	Yok
2017	828.337	720.000	826.799	827.097	839.528	Yok	Yok	Yok
2018	826.434	720.000	825.196	825.450	820.951	Yok	Yok	Yok
2019	824.535	720.000	823.577	823.738	844.327	Yok	Yok	Yok
2020	822.641	720.000	821.953	821.991	823.366	Yok	Yok	Yok
2021	820.751	720.000	820.329	820.226	833.069	Yok	Yok	Yok
2022	818.865	720.000	818.708	818.452	848.198	Yok	Yok	Yok
2023	816.983	720.000	817.089	816.676	797.352	Yok	Yok	Yok

19 numaralı piyezometreye ait ölçülen ve tahmin edilen değerler ile su kotu seviyesine ait ölçülen ve tahmin edilen değerler Şekil 3.5 de olduğu gibidir. Şekil 3.5 incelendiğinde piyezometrenin bulunduğu kotun oldukça derinde yer aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.5. 19 Nolu piyezometre aletine ait ölçü ve tahmin değerleri grafiği.

4. SONUÇ ve TARTIŞMA

Keban Barajı konumu, yapılış amacıyla ve yapıldığı tarih itibarıyla ülkemizin başyapıtlarından birisidir. İnşa edildiği tarihte teknolojik imkânlarla tamamlanmış devasa bir mühendislik yapıtıdır. Keban Barajı konumu itibarıyla, Fırat Nehri üzerinde yer alan büyük barajların en üst kısmında inşa edilmiştir. Bu bakımdan barajda meydana gelebilecek bir aksaklık Fırat Nehri üzerindeki Karakaya ve Atatürk barajlarını da ciddi anlamda tehlikeye atacaktır. Dolayısıyla Keban Barajı işletiminde sorumlu idare, söz konusu yapıya ait değişimleri, sadece gözle ve basit ölçü teknikleri ile değil, düzenli ve periyodik yapılan ölçü yöntemleri ile takip edilmelidir. Yapılan gözlem ve ölçümlerde tespit edilen değişiklikler uzmanlar tarafından analiz edilip gerekli tedbirler zamanında ve tam anlamıyla alınmalıdır.

Çalışmamız, Keban Barajı'nın toprak dolgu kısmında yer alan piyezometrelere ait boşluk suyu basınç miktarının tahmin edilmesini içermektedir. Bu amaçla piyezometrelere ait boşluk suyu basınç değerleri ve bu basınç değerleri ile yakından ilişkili olan baraj su kotu miktarı Gri Sistem ile tahmin edilmiştir.

Keban Baraj göletindeki su seviyesi değerleri, Gri tahmin yöntem ile yeniden değerlendirilmiştir. Aynı şekilde baraj kretinde yer alan ve krette oluşan boşluk suyu basıncı miktarını tespit etmek için yerleştirilen piyezometre aletlerine ait değerleri de yine gri tahmin yönteminin GM(1,N) model yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Yapılan değerlendirme sonuçlarına göre elde edilen tahmin verileri tablo ve şekiller haline getirilmiştir. Tablo ve şekiller incelendiğinde, 5 ve 13 numaralı piezometrelerin 2010 yılı için tahmin ettiği değerlerde deformasyonun varlığını göstermektedir. Bu durum iki şekilde yorumlanabilir. İlki özellikle 5 numaralı piyezometrenin 2010 yılına ait ölçü değerinin yanlış yazılması ve birlikte değerlendirilen 13 numaralı piyezometreyi etkilemiş olması şeklindedir. İkinci olasılık ise 2010 yılında meydana gelen Elâzığ-Palu depreminin baraj kretinin sıvılaşmasını tetiklediği ve ölçülen değeri artırmış olabileceği şeklinde yorumlanmıştır.

Bu deformasyon göstergesi hem tahmin değerlerinde hem de referans alınan ölçü değerlerinde ortaya çıkmış olması Gri Sistemin tahmin gücünün en iyi kanıtıdır. 5 numaralı piyezometre verilerinde yapılan analizde, 2010 yılı dışında hiçbir yıl için deformasyonun varlığını tahmin edilemezken, 13 numaralı piyezometre verilerinde

2013 ve 2015 yılları için deformasyon olmayacağını ancak diğer yıllar için deformasyonun olacağı tahmin edilmiştir. Bu sonuç 13 numaralı piyezometrenin yüzeye yakın yerleştirilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 19 numaralı piyezometreye ait ölçülerde ise herhangi bir deformasyon durumu tespit edilememiştir.

Bu değerler, gerçek anlamda barajda oluşan deformasyon değerlerini temsil etmemekle birlikte, oluşabilecek deformasyon miktarları hakkında isabetli tahmin değerleri elde etmemizi sağlayacaktır.

Elde edilen tahmin değerleri, Gri Sistem'in deformasyon analizinde kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir. Yöntemin daha kullanışlı hale getirilmesi amacıyla; yönteme ait matematiksel model Matlab ortamında hazırlanan bir yazılım paketi haline getirilmiştir. Bu yazılım paketi sadece başlangıç verisi olarak yaptığımız ölçümleri girip sonucu ekrana getirecek şekilde bir yazılım haline getirilmiştir. Böylece pratik ve kullanışlı bir yöntem olan Gri Sistem, yine pratik bir yazılım paketiyle kısa sürede ve az bir maliyetle deformasyon analizi hakkında sağlıklı ve isabetli tahmin yapmamızı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1]. **DUYGU, F.**, “Deformasyon ve Ölçme Yöntemleri”, Yüksek Lisans Bitirme Tezi, Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, 2012.
- [2]. **DENG, J. L.**, Grey forecasting and decision, Huazhong University of Science and Technology Press. 1986.
- [3]. **XIA, J. ve HU, B.**, “A grey system model for predicting trend change of urban waste water load” , Journal of Environmental Hydrology, Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, China Vol: 5, 1-10.1997.
- [4]. **LIN, C.T. ve HSU, P.F.**, “Forecast of nonalcoholic beverage sales in Taiwan using the grey theory”, Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics, Vol:14, Issue:4: pp. 3–12. 2002.
- [5]. **YEN J. F. ve CHENG S. P.**, “Hazard Risk Analysis of Typhoon Damage by Applying Grey System Theory”.
- [6]. **TRIVEDI, H.V. ve SINGH, J.K.**, “Application of grey system theory in the development of a runoff prediction model”, Bio Systems Engineering,92(4):521–526,2005.
- [7]. **MOHAMMADI, A., MORADI, L., TALEBNEJAD, A. ve NADAF, A.**, “The use of grey system theory in predicting the road traffic accident in Fars province in Iran”, Australian Journal of Business and Management Research, Vol:1 No:9, 18-23, 2011.
- [8]. **ERDEM C. ve CEVİZ E.**, “Gri Sistem Teorisi Kullanılarak Türkiye’nin Büyüme Oranı Faktörlerinin Analizi” SAÜ Fen Bil. Dergisi 19. Cilt, 3. Sayı, s. 361-369, 2015.
- [9]. **AYAYDIN H., DURMUŞ S. ve PALA F.**, “Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Türk Lojistik Firmalarında Performans Ölçümü”, GÜSBED, Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi Cilt: 8, Sayı: 21, Yıl: 2017.
- [10]. **SLAVEK N. ve JOVIC A.**, “Application of Grey System Theory to Software Projects Ranking” Online ISSN 1848-3380, Print ISSN 0005-1144, ATKAFF 53(3), 284–293 2012.
- [11]. **URL-1, 15:30, 24.03.2019**, https://www.researchgate.net/publication/259902425-C19-Monitoring_systems_for_earthfill_dam.
- [12]. **URL-2,15:30,15.04.2019**, http://www.dsi.gov.tr/docs/proje-teknik-sartnameler/baraj-ölçüm-cihazları-teknik-sartnamesi_r00_20061110.pdf
- [13]. **HOŞBAŞ, R. G.**, “Baraj Deformasyonlarının Belirlenmesinde Jeodezik Yaklaşımların İrdelenmesi ve Bir Öneri”, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1992.

- [14]. **İNAL C. ve BÜLBÜL S.**, “Bağlı Güven Elipsleri Yöntemiyle Deformasyon Analizi: Ermenek Barajı Örneği”, Selçuk Üniversitesi, Müh. Bilim ve Teknik Dergisi, c.1,s.3, 2013.
- [15]. **DOĞANALP S., TURGUT B. ve İNAL C.**, “Yükseklik Ağlarında S Transformasyonu ve Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu 23-25 Kasım 2005, İTÜ – İstanbul.
- [16]. **DOĞANALP S.**, “Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi”, Yüksek Lisans Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [17]. **LIU, S. ve LIN, Y.**, “Grey Information: Theory and Practical Applications”, Springer, 11-21. 2006.
- [18]. **LIU, S. F. ve LIN, Y.**, An Introduction to Grey Systems Theory. Grove City: IIGSS Academic Publisher, 1998.
- [19]. **LIN, C.T. ve YANG, S.Y.**, “Forecast of the output value of Taiwan’s IC Industry Using the Grey Forecasting Model”, International Journal Computer Applications in Technology, 19: 23–27., 2004.
- [20]. **KÖSE E., APLAK H. S. ve KABAK M.**, “Yetersiz Veri Ortamında Tahminler İçin Örnek Bir Uygulama: Gri Tahmin Yöntemi”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt:31, Sayı:1, Mart, 2015.
- [21]. **WEN, K.L.**, “Grey Systems: Modeling and Prediction”, Tucson, USA, YangSky Scientific Press. 2004.
- [22]. **TSENG, F.M., YU, H.C. ve TZENG, G.H.**, “Applied hybrid grey model to forecast seasonal time series”, Technological Forecasting and Social Change, 67(2):291–302, 2001.
- [23]. **DENG, J.L.**, The control problems of grey systems, System & Control Letters, 5: 288-294, 1982.
- [24]. **RUI LIU, XIAO-LEI LI.**, “Deformation Monitoring and Forecasting Model Study Based on Grey System Theory”. Fuzzy Information and Engineering, 62(2):555-564. 2009.
- [25]. **URL-3, 16:52,17.04.2019**, <https://tr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [26]. **KALKAN Y. ve ALKAN R. M.**, “Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri” Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu 23-25 Kasım 2005, İTÜ – İstanbul.
- [27]. **YALÇINKAYA M. ve KAYIKÇI E. T.**, “Dengeleme Heabı-II Ders Norları” Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2019.

- [28]. **ÖZGEN, N.**, “Keban Barajı ve Tarihçesi” DS_ Vakfı yayın No:1 Ankara. 2000.
- [29]. **URL-4, 15:28, 21.02.2019**, <http://www.dsi.gov.tr/projeler/keban-barajı>
- [30]. **URL-5, 13:30, 15.04.2019**, http://en.wikipedia.org/wiki/Fontenelle_Dam.



ÖZGEÇMİŞ

Kürşat Kaya 1981 yılında Malatya’da doğdu. İlk ve ortaokul eğitimini Battalgazi Yatılı İlköğretim Bölge Okulu’nda, lise eğitimini Kubilay Lisesi’nde tamamladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans yapmayı hak kazanmış olup, orta derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

