



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YAPILARDAKİ DEFORMASYONLARIN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
ARAŞTIRILMASI

Berra Nur ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran- 2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Berra Nur Şen tarafından hazırlanan “Yapılardaki Deformasyonların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Cevat İNAL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ
(Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Berra Nur ŞEN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

YAPILARDAKİ DEFORMASYONLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE ARAŞTIRILMASI

Berra Nur ŞEN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL

2024, 63 Sayfa

**Jüri
Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL
Prof. Dr. Cevat İNAL
Doç. Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ**

Mühendislik yapılarında deformasyondan kaynaklı meydana gelebilecek herhangi bir kaza önceden tespit edilip gereken önlemler alınmazsa çok ciddi can ve mal kayıplarına sebep olabilir. Yapının hareketlerinin takibi alışılagelmiş jeodezik ve geoteknik yöntemler ile yapılabilir. Sonlu elemanlar yöntemi, deformasyonları sayısal analiz tekniği ile büyük bir yaklaşıklık ile elde edebilmek için tercih edilebilir. Sonlu elemanlar yöntemi, deformasyonların belirlenmesinde önemli bir kullanıma sahiptir. Deformasyon araştırmalarında jeodezik veya jeodezik olmayan yöntemler kullanılmadan da yalnızca yapının malzeme özellikleri girdi olarak kullanılarak yapının kendi ağırlığı ve dış yüklerin etkisi altında oluşacak deformasyonlar belirlenebilir.

Bu çalışma kapsamında nokta bazlı analiz gerçekleştiren jeodezik yöntemler ile alan bazlı analiz gerçekleştiren sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarının karşılaştırılması ve mühendislik bakış açısı ile yorumlanması amaçlanmıştır. Çalışmada Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi binası üzerinde seçilen 25 adet obje noktalarında gidiş- dönüş nivelman yöntemi ile yükseklik farkları belirlenmiştir ve s-transformasyon yöntemi ile deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir ve yükseklik bilinmeyenleri elde edilmiştir. Yapı SAP2000 bilgisayar programı ile sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapı yalnızca kendi ağırlığı altında analiz edilmiştir. Malzeme parametreleri girdi olarak kullanılmıştır ve yapı sonlu elemanlarına bölünmüştür. Toplam 65989 adet düğüm noktası elde edilmiştir. Ancak yalnızca seçilen obje noktalarına denk gelen düğüm noktaları değerlendirmeye alınmıştır. Jeodezik yöntem ile yapılan analiz sonucu ile SEY ile gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında sonuçlar belirli bir oranda yakın çıkmıştır. Yapıya ait temel şartları ve yapıya etkiyen diğer yüklerde ilave edilirse daha doğru sonuçlar elde edileceği şeklinde yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Geoteknik Yöntemler, Jeodezik Yöntemler, Sonlu Elemanlar Yöntemi, S transformasyonu.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF DEFORMATIONS IN STRUCTURES BY FINITE ELEMENT METHODS

Berra Nur ŞEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Sercan BÜLBÜL

2024, 63 Pages

Jury

Assoc.Prof.Dr. Sercan BÜLBÜL

Prof. Dr. Cevat İNAL

Assoc.Prof.Dr. Fuat BAŞÇİFTÇİ

In engineering structures, any accident caused by deformation can lead to significant loss of life and property if not detected in advance and necessary precautions are not taken. The movements of the structure can be monitored using traditional geodetic and geotechnical methods. The finite element method can be preferred to obtain deformations with great accuracy using numerical analysis techniques. The finite element method has significant use in determining deformations. In deformation studies, the deformations that will occur under the influence of the structure's own weight and external loads can be determined using only the material properties of the structure as input, without using geodetic or non-geodetic methods.

This study aims to compare the analysis results obtained using geodetic methods that perform point-based analysis and the finite element method that performs area-based analysis, and to interpret them from an engineering perspective. In the study, height differences were determined using the round-trip leveling method at 25 selected object points on the Faculty of Law building at Selçuk University, and deformation analysis was carried out using the s-transformation method to obtain unknown heights. The structure was analyzed using the finite element method with the SAP2000 software. The structure was analyzed only under its own weight. Material parameters were used as input, and the structure was divided into finite elements. A total of 65,989 node points were obtained. However, only the node points corresponding to the selected object points were evaluated. When the analysis results obtained by the geodetic method and the analysis results obtained by the finite element method were compared, the results were found to be close to a certain extent. It was interpreted that more accurate results would be obtained if the basic conditions of the structure and other loads affecting the structure were added.

Keywords: Deformation, Finite Element Method, Geodetic Methods, Geotechnical Methods, S transformation.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın tamamlanmasında danışman hocam Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL'e bana gösterdiği yol ve sunduğu değerli bilgi birikimi ile bu çalışmanın her aşamasında sağladığı rehberlik için sonsuz teşekkür ederim. Kendisi bu çalışmanın her aşamasında beni destekleyerek çalışmanın doğru bir şekilde ilerlemesini sağlamıştır. Tüm eğitim hayatım boyunca bilgi birikimleri ile bizlere her türlü desteği sağlayan saygı değer hocalarıma ve görev yapmakta olduğum Erciyes Üniversitesi'ndeki hocalarıma teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca Selçuk Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı birimi daire başkanı sayın İsmail TONGARLAK ve birim personellerine tez için kullanılan projelerin temini konusunda gösterdikleri yardım için teşekkür ederim.

Ailemin sonsuz desteği ve anlayışı için minnettarım, bu süreçte bana en büyük güç oldu. Son olarak lisans eğitimimden bu yana manevi desteğini benden esirgemeyen nişanlım Mehmet Emin TUNÇ'a sonsuz teşekkürler.

Berra Nur ŞEN
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Araştırması.....	2
1.2. Tezin Bölümleri	10
2. DEFORMASYON ÖLÇME YÖNTEMLERİ.....	11
2.1. Deformasyon Ölçmelerinin Amacı ve Uygulama Alanları.....	11
2.2. Deformasyonların Nedenleri.....	12
2.3. Deformasyon Ölçme Yönteminin Seçiminde Dikkat Edilen Hususlar.....	12
2.4. Deformasyon Ölçme Yöntemleri	13
3. DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİNDE JEODEZİK ve GEOTEKNİK YÖNTEMLER	14
3.1. Jeodezik Yöntemler.....	14
3.1.1. Aliyman yöntemi	14
3.1.2. Hassas poligon yöntemi	15
3.1.3. Jeodezik ağ yöntemi.....	15
3.1.4. Hassas nivelman yöntemi	16
3.1.5. Trigonometrik nivelman yöntemi	17
3.1.6. GNSS Yöntemi ile Deformasyon Ölçmeleri	17
3.2. Geoteknik Yöntemler	18
3.2.1. Klinometre	18
3.2.2. Çatlak, derz ölçer	18
3.2.3. Ekstensometre	18
3.2.4. İnklinometre.....	18
3.2.5. Sarkaç.....	18
3.2.6. Piyezometre	19
3.2.7. Debi ölçer.....	19
3.2.8. Manyetik oturma kolonları	19
3.2.9. Yük hücresi	19
3.2.10. Basınç hücresi	19
3.2.11. Teletermetreler	19

4. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	20
4.1. Deformasyon Modelleri	20
4.1.1. Uyum modeli	20
4.1.2. Kinematik model.....	21
4.1.3. Statik model	21
4.1.4. Dinamik model	21
4.2. Deformasyon Modellerinin Karşılaştırılması.....	22
4.3. Deformasyon Analiz Yöntemleri	22
4.3.1. S transformasyonu yöntemi ile deformasyon analizi.....	23
5. SONLU ELEMANLARLAR YÖNTEMİ.....	27
5.1. SAP2000	34
6. UYGULAMA	40
6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deformasyon Analizi	42
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
7.1. Sonuçlar.....	47
7.2. Öneriler	48
8. KAYNAKLAR	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

γ	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m^3)
E	Elastisite Modülü (kN/m^2)
η	Poisson Oranı
α	Isıl Genleşme Kat Sayısı ($1/^\circ\text{C}$)
f_{ck}	Silindir Basınç Dayanımı (kN/ m^2)
f_y	Min. Akma Dayanımı
f_u	Min. Çekme Dayanımı
f_{ye}	Tas. Akma Dayanımı ($f_y * 0,9$)
f_{ue}	Tas. Çekme Dayanımı ($f_u * 0,9$)

Kısaltmalar

DGPS	:Differential Global Positioning System
EKKY	:En Küçük Kareler Yöntemi
GNSS	:Global Navigation Satellite Systems
GPS	:Global Positioning System
PSEY	:Parçacık Sonlu Elemanlar Yöntemi
RTS	:Robotik Total Station
SEY	:Sonlu Elemanlar Yöntemi
GUI	:Graphical User Interface

1. GİRİŞ

İnsan yaşamını doğrudan etkileyen ve temel birçok ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan mühendislik yapılarının hareketlerinin belirli sınırlar dahilinde olması, deformasyon olup olmadığının belirlenmesi ve eğer deformasyon var ise meydana gelebilecek muhtemel kazaların önceden tespit edilerek can ve mal kayıplarına neden olmadan zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak amacı ile deformasyon ölçmeleri insan sağlığı ve güvenliği açısından önemli bir konudur. Yapıda oluşabilecek hareketlerin takip edilip belirlenmesi yapının insan yaşamı açısından güvenli olup olmadığı kararının verilmesinde oldukça önemlidir. Mühendislik yapılarında oturma, kabarma, kayma, yer değiştirme, kırılma, bükülme gibi hareketlerin yapıda meydana getirdiği değişimler deformasyon olarak adlandırılır. Meydana gelebilecek her hareket veya değişim yapıda deformasyon olduğu anlamına gelmeyebilir. Meydana gelen bu değişimlerin bir deformasyon ifade edip etmediğini anlamak için deformasyon ölçmeleri gerçekleştirilir ve analizi yapılır. Bu amaçla deformasyonların belirlenmesi için gerçekleştirilen ölçme yöntemleri jeodezik ve geoteknik ölçme teknikleridir. Ayrıca deformasyonların belirleneceği yapıda geoteknik yöntemlerden Sonlu Elemanlar Metodu (SEY) kullanılarak yapı tamamlanmamış ya da ulaşılması zor olsa bile, yapının malzeme özellikleri girdi olarak kullanılarak yapının kendi ağırlığı ve dış yüklerin etkisi altında oluşacak yer değiştirmeler belirlenebilir. Deformasyonların belirlenmesi amacı ile geliştirilen bu ölçme teknikleri arasından en uygun ölçme yönteminin seçilmesinde belirli ölçütler vardır. Bu ölçütler şunlardır:

- Deformasyonu belirlenecek yapıya ait fiziksel özellikler,
- Çevresel etkiler (zeminde ait geoteknik özellikler, atmosferik koşullar gibi),
- Yapıda meydana gelebilecek muhtemel hareketlerin büyüklüğü ve yönü (yapı sürekli olarak ya da belirli aralıklar ile takip edilir ve yüksek doğrulukta ölçme sistemi kullanılarak bu muhtemel hareketler saptanabilir),
- Deformasyon araştırmasının getireceği ekonomik etkiler (Erol, 2008).

Belirtilen ölçütler değerlendirilerek uygun jeodezik ya da geoteknik yöntemlerden biri uygulanabilir. Deformasyon ölçmelerinde jeodezik yöntemler yapının davranışlarını global bir şekilde irdelerken geoteknik yöntemler ise yapının belirli bir sınır içerisinde incelenmesini sağlar (Erol, 2008).

Bu çalışma kapsamında jeodezik yöntemler ile deformasyon analizi ve sonlu elemanlar yöntemi teorik olarak açıklanmış, daha sonra beş katlı betonarme bir yapıya ait hareketler hem jeodezik hem de sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir. Her iki yönteme ait sonuçlar karşılaştırılmıştır ve sonuçları yorumlanmıştır.

1.1. Kaynak Araştırması

Son yıllarda, deformasyon araştırması ve analiz yöntemleri ile ilgili yapılan çalışmaların bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

Ding ve ark. (2004), tarafından geliştirilen GPS (Global Positioning System) çoklu anten cihazının performansını test edip test sonuçlarını sunmuşlardır. Test Xiaolangdi barajında yapılmıştır. Yapılan deformasyon izlemesi için işlem sonrası konumlandırma doğruluğu $\pm 1-2$ mm civarındadır. Testlerde ayrıca GPS çoklu anten sisteminin kararlı olduğu, kurulumu ve çalıştırılması kolay olduğu tespit edilmiştir. Bu sistemin barajlar, yamaçlar ve heyelanlar gibi olguların deformasyonunun izlenmesi için potansiyel olarak uygun maliyetli bir çözüm olduğu sonucuna varmışlardır.

Taşçı ve ark. (2004), jeodezik ve SEY kullanılarak kaya dolgu barajlarda hem su yükü hem de barajın kendi ağırlığı göz önüne alınarak baraj kretinde oluşacak deformasyonların belirlenmesine çalışmışlardır. İki yönteme de ait olan hem yatay hem düşey yöndeki deformasyonlar karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Demirkaya (2005), Oymapınar barajındaki yatay yöndeki değişimleri fiziksel olarak yorumlayabilmek için geometrik analiz yardımı ile elde edilen bulguları kullanmıştır. Baraj gövdesi 5888 düğüm noktası ve 4221 sonlu elemandan oluşturularak üç boyutlu sonlu elemanlar ağı ile modellemiştir. Çalışma sonucunda kemer barajın tasarım aşamasında öngörülen yatay yöndeki değişim varsayımlarının sağlandığı sonucuna ulaşmıştır.

Kalkan ve Alkan (2005), çalışmalarının amacı insan eli ile yapılmış ve insan hayatını çok fazla ilgilendiren mühendislik yapılarında meydana gelebilecek şekil değiştirmelerin belirlenmesi amacı ile kullanılan ölçme yöntemleri ve analizlerinin açıklanmasıdır. Bu çalışmada da Karakaya Demiryolu Köprüsünde meydana gelebilecek olan deformasyonların belirlenmesi için kurulan klasik ölçmeler yöntemi ile deformasyon izleme ve büyük barajlarda kurulmuş hem jeodezik hem de jeodezik olmayan yöntemlere ait sistemler anlatılmıştır.

Güler ve ark. (2006), makalesinde kademeli olarak inşası yapılan ve toprak dolgu bir baraj olan Alibey Barajının tamamlanmasının ardından oluşan hareketleri jeodezik ve geoteknik yöntemler ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada 1987-1991 döneminde belirlenen ölçmeler ile 1991-1996 yılları arasındaki yatay ve düşey ölçmeler jeodezik olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca yatay ve düşey hareketleri belirlemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak barajın davranışı analiz edilmiştir. Her iki yöneme ait sonuçlar karşılaştırılmıştır ve değerlerin uyum içinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kulkarni ve ark. (2006), çalışmalarında Koyna Barajını çevreleyen fay hattındaki deformasyon alanını irdlemek için Aralık 2000'den Eylül 2004'e kadar dağılımı iyi yapılmış jeodezik noktalardan oluşan ağ sistemi kurulmuş ve GNSS (Global Navigation Satellite Systems) gözlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen veriler analiz edilmiştir ve her bir dönem çifti arasındaki deformasyonlar ve tüm jeodezik noktalar için ilk ve son dönem arasındaki deformasyon oranı tahmin edilmiştir. Çalışma sonucunda "Koyna Barajı'nın güvenliğini izlemek, fay eğilimleri ve konumu hakkında önemli bilgiler elde edebilmek için jeodezik noktaların sayısı arttırılmalı ve geniş bir alanı kapsayacak şekilde yayılmalıdır" önerilerinde bulunmuşlardır.

Özkuzukıran ve ark. (2006), ön yüzü beton kaplı kaya dolgu bir baraj olan Kürtün Barajına ait oturma davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile hem inşaat aşamasında hem de rezervuar dolumu aşamasında irdelenmesi üzerine çalışmışlardır. SEY ile analiz için PLAXIS programını kullanmışlardır. PLAXIS programının deformasyon özelliklerini doğru bir şekilde yansıtabildiği sonucuna varmışlardır.

Gikas ve Sakellariou (2008), uluslararası makalede Mornos Barajının uzun vadede oturma davranışını sonlu elemanlar yöntemi ve düşeyde yapılan yer değiştirmeyi ise jeodezik ölçmeler ile belirleyip bu iki sonucun karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırma sonucunda yer değiştirmeler arasında iyi bir uyum olduğu sonucuna varılmıştır.

Taşçı (2008), çalışmasında Altinkaya barajı kretinde farklı seviyelerde oluşan su yükünün barajın kendi ağırlığı ile birleşmesi sonucu meydana gelen deformasyonun izlenmesi ve analiz edilmesini amaçlamıştır. Çalışmanın diğer amacı ise baraj deformasyon ölçmelerinde GPS ölçmelerinin beklenen doğruluğu karşılayıp karşılayamayacağına araştırılmasıdır. GPS, deformasyon ölçmeleri ve analizi için hassas ekipman ve analiz yöntemlerine olan gereksinimleri karşılamaktadır ve bu nedenle bu araştırma için GPS alıcıları kullanılmıştır.

Erkaya ve ark. (2009), Oymapınar barajındaki yatay ve düşey yönlü değişimleri modern ölçme teknikleri ile belirlemişlerdir. Yatay yöndeki değişimleri belirlemek için klasik ölçme yöntemlerinin yanı sıra GPS ölçülerini de kullanmışlardır. Düşey yöndeki değişimler için ise hassas nivelman, hassas trigonometrik nivelman ve GPS nivelmanı yöntemlerini kullanarak değişimleri belirlemişlerdir.

Keskin ve ark. (2009), makalesinde kaya dolgu bir baraj olan Dim Barajı'nın deprem yükü etkisindeki hareketleri incelemiştir. Ayrıca barajda oluşacak yer değiştirmelerde değerlendirilmiştir. Çalışmaya konu olan baraj sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sonuç olarak deprem yükünün barajlar üzerindeki önemi saptanmıştır.

Shariatmadar ve Mirhaj (2009), beton ağırlıklı bir barajı inceleyerek deprem kuvvetleri ile sıvı-yapı etkileşiminin neden olduğu hidrodinamik basınçları incelemişlerdir. ANSYS programı yardımı ile rezervuar baraj temel sistemi sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Analizler sonucu elde edilen periyot ve hidrodinamik basınç dağılımlarını elde etmişlerdir.

Wen ve ark. (2009), çalışmalarında farklı sismik girdi mekanizmalarını kullanarak güçlü depremler sırasında kemer barajlarda meydana gelebilecek hasar-çatlama davranışının analizini gerçekleştirmek amacı ile sonlu eleman yöntemini kullanarak Çin'deki Dagangshan Kemer Barajı'nın davranışını iki farklı deprem modelini dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak sismik girdilerin, barajın doğrusal olmayan tepkisi ve hasar-çatlaması üzerindeki etkilerinin önemli olduğunu saptamışlardır.

Trinh ve Zhang (2010), çalışmalarında, deprem esnasında baraj-rezervuar etkileşimi, Euler yaklaşımına dayandırılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Baraj gövdesine akışkan hidrodinamik basıncının uygulandığı ve barajın deformasyonunun su sahası üzerinde hiçbir etkisi olmadığı varsayımı kabul edilmiştir. Bu yöntemin sıvı-yapı etkileşimine uygulanabilirliğinin kabul edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Yiğit (2010), doktora tezinde, GPS ve eğim sensörü kullanarak yüksekliği yaklaşık 100 m olan çok katlı bir binanın rüzgar ve depremsel etkiler altında gösterecekleri dinamik tepkileri aynı anda izlemiştir. Kullanılan 5 farklı veri setinden dördü rüzgar biri depremsel etkilere ait veri seti kullanarak analizlerini gerçekleştirerek yapının dinamik parametrelerinden doğal frekansları belirlemiştir. Analiz sonucunda bu iki sensörün dinamik hareketleri saptayabilme yetenekleri avantaj- dezavantaj şeklinde değerlendirmiş ve her iki sensörün bir arada kullanımını önermiştir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi

ile yapıyı modellemiş ve teorik olarak da doğal frekansları ve yer değiştirmeleri elde etmiştir. Veri setleri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile SEY ile elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçların SEY sonuçları ile uyum içerisinde olduğunu belirtmiştir.

Ehiorobo ve Ehigior (2011), uluslararası makalede, DGPS (Differential Global Positioning System) yöntemini kullanarak toprak dolgu barajı tipindeki Ikpoba Barajında yatay yöndeki hareketleri belirlemeyi amaçlamışlardır. Yatay yönlü hareketleri belirlemek için jeodezik ağ kurulmuştur. Baraj kreti boyunca on bir kontrol noktası ve dokuz referans noktasından oluşan yirmi GPS istasyonu en az 1 saat boyunca gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen analiz ile jeodezik ağdaki noktaların tamamının hareket halinde olduğu sonucuna varılmıştır. Toprak dolgu baraja ait hareketlerin DGPS yöntemi ile üç boyutlu izlenmesinde yüksek duyarlılıkta sonuçlar elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Wang ve ark. (2011), uluslararası makalede, Three Gorges Barajı ve çevresinde meydana gelecek deformasyonları SAR görüntülerini kullanarak tespit edilmesi üzerine çalışmışlardır. Gerçekleştirilen çalışma ile barajın sol tarafındaki hareketlerin durduğu SAR görüntüleri yardımı ile tespit edilmiştir. Barajda gerçekleşen hareketlerin rezervuar su seviyesiyle doğrudan ilgili olduğu, bu ilişkinin klasik ölçme yöntemler ile elde edilen veriler ile uyum içerisinde olduğu sonucuna varmışlardır.

Uysal (2012), Alibey Barajı'ndaki düşey yöndeki yer değiştirmeyi geometrik nivelman yöntemi ile belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Ölçme periyotlarında, dolaylı ölçme teknikleriyle serbest ağ dengellemeleri gerçekleştirilmiştir. Deformasyon analizinde matematiksel ve istatistiksel olarak Hannover Yaklaşımı kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bülbül (2013), yüksek lisans tezinde, Cholesky çarpanlarına ayırma ve bağıl güven elipsleri yöntemlerini yatay yöndeki deformasyonları statik olarak belirlemek amacı ile teorik açıdan incelemiştir. MATLAB 7.6.0 release 13.0 M-File' bir programı Cholesky çarpanlarına ayırma yöntemi için hazırlamıştır. Bu çalışmada Ermenek barajı için her iki yöntem kullanılmış ve yer değiştirmeler belirlenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak her iki yöntemde uyum içinde olduğu sonucuna varılmıştır.

Alçay (2014), doktora tezinde, beton kemer baraj olan Ermenek Barajı'nda hem jeodezik hem de geoteknik yöntemler kullanılarak detaylı bir irdeleme gerçekleştirmiştir. Bu yöntemler ile elde edilen sonuçlara göre maksimum hareket 1.5 cm'dir. Sıcaklık ve su seviyesinin belirlenen bu hareketler ile olan bağlantısı incelenmiştir. Jeodezik yöntemler ile elde edilen sonuçların sarkaç ve klinometre gibi geoteknik cihazlardan

gelen veriler ile uyumluluğunu incelemiştir. Ayrıca inklinometre ve jeodezik sonuçların birbirini tamamlama durumu, mesnetlerdeki yük hücresi ve ekstensometre verilerinin uyumunu da incelemiştir. Tüm bu sonuçların sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değer ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Kalkan (2014), büyük barajlarda gerekli olan deformasyon belirleme tekniklerini tanıtip örnek bir analiz olarak da Atatürk Barajında devam eden deformasyonların belirlenmesi çalışmalarını tanıtmıştır. Bu çalışmada, hareket olması beklenmeyen sağlam zemin üzerinde yerleştirilen 32 noktadan oluşan referans ağı ve hareket olması muhtemel olan alanlara yerleştirilen yaklaşık 400 noktalı bir deformasyon ağı kurulmuştur. Mayıs 2006'da başlayan ilk ölçmeler, Kasım 2013'te yapılan klasik ölçme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 7,5 yıllık süreçte, obje noktalarının yaklaşık %80'inde anlamlı hareketler olduğu sonucuna varılmıştır.

Kulkarni ve Santhi (2015), uluslararası makalede, hidrolik yapıların deprem titreşimlerine karşı direnç gösterecek şekilde tasarlanması gerektiğinden beton ağırlıklı bir barajın dinamik analizini SAP 2000 kullanarak hesaplamışlardır. Bu makale giriş fonksiyonu olarak zaman ivmesi verilerini kullanarak doğrusal olmayan zaman alanı analizini gerçekleştirmiştir. Sonuçlardan, ivmenin barajın üst kısmında daha fazla, alt kısmında ise minimum olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Yiğit ve ark. (2015), Ermenek Barajı'nın ilk dolum dönemindeki dinamik davranışlarını belirlemek amacıyla, inşaat sırasında ve sonrasında jeodezik ve jeoteknik yöntemlerle sistematik olarak izlemişlerdir. Ayrıca SEY analizlerinden de faydalanmışlardır. Bu makalenin yazıldığı sırada aletlerden gelen jeoteknik veriler mevcut olmadığı için baraj deformasyonları sadece jeodezik verilerle değerlendirilmiştir. Jeodezik ölçmeler başlangıçta hem geleneksel hem de GNSS teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baraj iki sarp kayalık arasında inşa edildiğinden, aşırı sinyal gölgelemesi ve multipath etkisi nedeniyle uydu konumlandırması sorunlu olduğundan, beklenen yer değiştirmelerin küçük büyüklükleri göz önüne alındığında, mikro jeodezik ağ şeklinde gerçekleştirilen geleneksel jeodezik yöntemleri kullanılmışlardır. Yatay deformasyonları belirlemek üzere 10 adet referans noktası ve 19 adet nesne noktası olmak üzere mikro jeodezik bir ağ oluşturmuşlardır. Korelasyon analizi, barajın periyodik ve lineer yer değiştirme tepkilerinin sırasıyla mevsimsel sıcaklık değişimleri ve lineer olarak artan rezervuar seviyesi ile ilişkili olduğunu ortaya çıkarmıştır, bu da sıcaklık, su yükü ve baraj deformasyonu arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca jeodezik verilere

dayalı ölçülen deformasyonların SEY analizi ile elde edilen tahmin edilen deformasyonla iyi bir uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Alkan ve ark. (2016), makalelerinde, Obruk Barajı gövdesi ve çevresinde olası yatay ve düşey yöndeki deformasyonları belirlemek için 8 adet referans noktası, 6 adet RS noktası ve 44 adet obje noktasından oluşan jeodezik bir ağ kurmuşlardır. Nisan 2015’de GNSS ölçmeleri ve nivelman ölçmeleri uygulanırken, Nisan 2016’da bu ölçmelerin yanı sıra robotik total station yardımı ile açı-kenar ölçmeleri de yapmışlardır. Çalışma sonucunda 1. Periyot da açı- kenar ölçmeleri yapılamamış olduğundan dolayı tam bir değerlendirme sonucuna varamamışlardır.

Chai ve ark. (2016), çalışmalarında çok kuleli asma köprülerde deformasyon ölçmesi ve kiriş sehimini belirlemek amacı ile bir yöntem geliştirmişlerdir. Kule ve kablolarının yay gibi düşüldüğü köprüyü temsil etmesi amacı ile eşdeğer bir model geliştirmişlerdir. Bu makalede ayrıca analitik formülü doğrulamak amacı ile asma köprünün sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. SEY ile elde edilen ile geliştiren modele ait sonuçların uyum içinde olduğunu tespit etmişlerdir. Yani geliştirilen yöntemin çok kuleli asma köprülerde ön analiz ve tasarım açısından kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Ghafari ve ark. (2016), uluslararası makalede, İran’daki Chenareh Barajı’nın gövdesinin aşamalı inşasını ele almakta ve geçiş bölgelerinin elastisite modülü ve çekirdek geometrisi gibi parametrelerin baraj çekirdeği içindeki kemer hareketi üzerindeki etkisini araştırmak için sonlu eleman analizi kullanmaktadır.

Wu ve ark (2016), çalışmasında Jinping-I Kemer Barajı’nın ilk su tutması sırasındaki gerilme, deformasyon ve sızıntı basıncını incelemek amacı ile, Kasım 2014’ ün sonuna kadar ilk su tutmanın son döneminde barajın oturma davranışını hem baraj davranışlarını izleyip analiz ederek hem de sayısal hesaplama yolu ile incelemiştir. Kemer barajın deformasyonu sayısal hesaplamada barajın üç boyutlu bir sonlu eleman modeli kullanılarak, baraj gövdesi ve temelinin elastik modülünün (E) tersine çevrilmesi yoluyla ve gerilmesinin geri besleme analizine dayalı olarak yapılmıştır.

Acosta ve ark. (2018), uluslararası makalede, toprak dolgu baraja ait yüksek hassasiyetli jeodezik yöntemler ve SEY ile elde edilen verilerin analizini gerçekleştirmişlerdir. Baraj kreti üzerindeki yatay yöndeki hareketler için sonlu elemanlar analiz yöntemine göre hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasında ortalama 6 cm, düşey yönde hareketinde ise yaklaşık 15 cm fark tespit etmişlerdir. Böylesine yüksek bir farkın olası nedeni sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken modelleme sürecindeki

yapının sonlu elemanlarına bölünmesinde basitleştirmeden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır.

İbaoğlu (2019), yüksek lisans tezinde, Ermenek barajında düşey yöndeki hareketlerini belirlemek amacı ile yükseklik ağı kurmuştur ve hassas nivelman yöntemi ile yükseklik farklarını belirlemiştir. Oluşturulan ağda deformasyon analizini hem S-transformasyonu hem de Kalman filtreleme yöntemi ile yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki yönteme ait sonuçların uyumlu olduğu sonucuna varmıştır.

Konakoğlu (2019), doktora tezinde, beton kemer baraj tipinde olan Deriner Barajında GNSS ölçmelerine dayanarak 2016 ve 2017 yılları arasında jeodezik olarak deformasyon belirlemeyi amaçlamıştır. Yataydaki ve düşeydeki yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için statik, kinematik ve dinamik deformasyon modellerini uygulamıştır. Uygulanan tüm modeller uyumlu bir sonuç vermiştir. Baraj su seviyesindeki değişimlerin etkisi barajdaki yer değiştirmeler üzerindeki etkisinin önemi gösterilmiştir. Barajdaki yer değiştirmelerin jeodezik ölçüler ile belirlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tekin ve ark. (2019), çalışmalarında tünel deformasyonunun sonlu elemanlar yöntemi ve arazi ölçmeleri ile elde edip sonuçları karşılaştırmışlardır. Bu makalede çalışma alanı olarak Topçam Tüneli seçilmiştir. Analiz sonucunda deformasyonların dağılım grafikleri 5 nokta için oluşturulmuştur. Arazide yapılan ölçmeler ile dağılım grafiklerine ait sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda her iki sonucun uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Ünsal ve ark. (2019), çalışmalarında kil çekirdek kaya dolgu barajı olan Köprübaşı Barajı'nın oturma davranışını inşaat hali ve su tutma durumu için sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Hesaplanan deformasyon sonuçları barajın gövdesine yerleştirilen çapraz kollu çökme ölçerler ile hesaplanan deformasyon değerleri karşılaştırılmıştır ve sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Balı (2021), yüksek lisans tezinde, beton kemer baraj olan Deriner Barajı'nda geoteknik yöntemler ile deformasyonların belirlenmesini açıklamıştır. Deformasyon izlemesinde kullanılan cihazlar tanımlanmıştır ve barajın yapısal davranışı araştırılmıştır. Geoteknik yöntemler kullanılarak tespit edilen deformasyonların sıcaklık ve rezervuar su seviyesi ile ilişkisini analiz etmiştir. Analiz sonucu elde edilen bulgular ilk dolum süreci için SEY ile elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Bu değerler geoteknik sonuçlarla uyumlu çıkmıştır.

Bilgen (2022), doktora tezinde, statik GNSS tekniğini kullanarak periyotlar halinde elde edilen ölçmelerin değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar ile, İteratif ağırlıklı

benzerlik dönüşümü yöntemi ile deformasyon analizi için R dilinde, “DefAn-for-GNSS-networks” isimli program geliştirmiştir. Çalışmasında hazırlanan programın test edilmesi amacı ile Selçuk Üniversitesi kampüsü üzerinde jeodezik bir ağ oluşturmuş ve hazırlanan bir düzenek üzerinde yatayda ve düşeyde 1 cm olacak şekilde sanal deformasyon oluşturularak GNSS ölçmelerini gerçekleştirmiştir. Çalışma ile hazırlanan programla deformasyonlar belirlenebilse de GNSS ölçmelerinin değerlendirilmesinde etkili olan faz başlangıç belirsizliği çözümleme oranlarının ve gözlem sayılarının kontrolünün analizden önce yapılması ve analize ancak uygun koşullar sağlandıktan sonra geçilmesi gerektiğinin önemini vurgulamıştır.

Carbonell ve ark. (2022), uluslararası makalede, parçacık sonlu elemanlar yönteminin (PSEY) jeoteknik problemlerde kullanımı için özel olarak geliştirilmiş bir kod olan G-PSEY'e odaklanmışlardır. PSEY, klasik SEY yeteneklerinin ötesinde büyük yer değiştirme ve büyük gerinim sürekliliği problemlerini çözmek için sayısal bir yaklaşımdır. Çalışmadaki amaçlarından biri G-PSEY'in mevcut sürümünün yetenekleri ve ana özellikleri hakkında genel bir bilgilendirme sunmak ve ikincisi, kodun bazı yeni gelişmelerini göstermektir.

Zvanut (2022), çalışmasında, barajın üst kısmının yatay yer değiştirmelerinin ölçmeleri için otomatik bir sistemin kurulduğu büyük bir kemer-ağırlıklı Moste Barajını analiz etmiştir. Toprak basınçları ve hidrostatik yük dikkate alınarak baraj davranışının iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) analizleri SEY dayalı bilgisayar programı olan DIANA kullanılarak, yapılmıştır. Gerçekleştirilen 2B ve 3B sonlu elemanlar yöntemine ait analizlerin sonuçlarının, asılı bir sarkaç kullanılarak elde edilen yatay yer değiştirmelerin sonucu ile çok iyi uyum sağladığı sonucuna varmıştır.

Demirci (2023), yüksek lisans tezinde, Güven elipsoitleri yöntemini kullanarak obje noktalarındaki deformasyonların belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmasında güven elipsoitleri yöntemi kullanılarak deformasyon analizi yapabilmek amacı ile MATLAB R2021a'de bir program hazırlamıştır. Bu program ile Selçuk Üniversitesi kampüs alanında oluşturulan mikro jeodezik ağda sanal deformasyonlar verilerek elde edilmiş olan veriler “Leica Geo Office versiyon 8.2 (LGO v8.2)” ve “Bernese v5.2 Bilimsel GNSS değerlendirme yazılımı” ile değerlendirmiştir ve “MATLAB R2021a” da hazırlanan programı test edebilmek amacıyla, güven elipsoitleri yöntemi ile çözüm excel ortamında da gerçekleştirmiş ve tamamen aynı değerleri elde etmiştir.

Zhang ve ark. (2024), uluslararası makalesinde, hareketli yükler altında üç kablolu asma köprünün iç kuvvetlerini ve deformasyonlarını belirlemeyi sağlayan bir algoritma

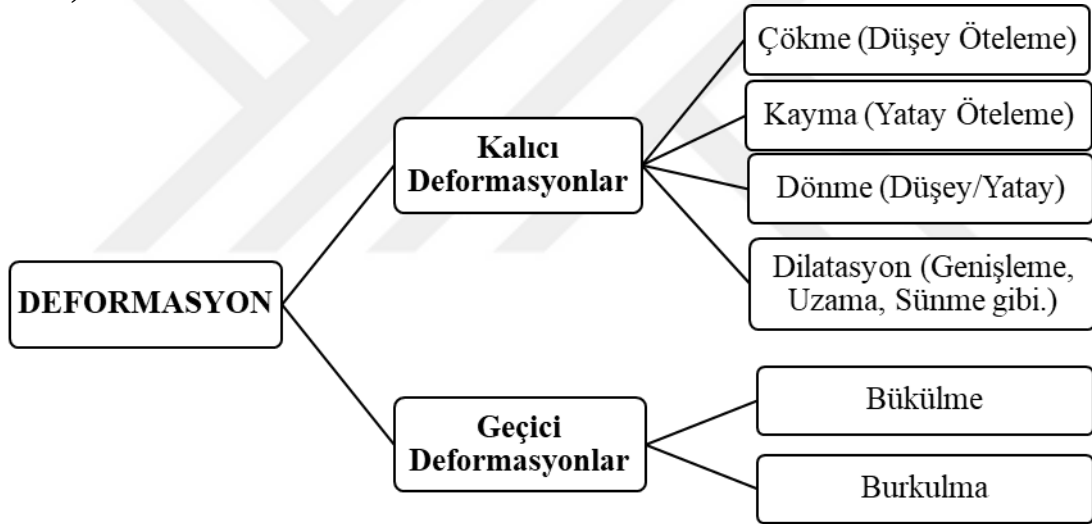
oluşturmayı amaçlamaktadır. Asma köprünün ölü yük altındaki parametreleri bilinenler olarak ele alınmıştır. Geliştirilen analitik modelin uygulanabilirliği sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplananlar ile karşılaştırmıştır. Tüm köprü için uygun olmayan yük dağılımları ve bunlara karşılık gelen maksimum ve minimum eksenel kuvvetleri MATLAB kullanarak elde etmiştir. Önerilen yöntemi 1600 m ana açıklığa sahip bir üç kablolu asma köprüye başarıyla uygulamıştır. Askıların orta açıklık ve çeyrek açıklık noktasındaki en elverişsiz yük dağılımları ve maksimum ve minimum eksenel kuvvetleri tahmin edilmiştir. Hesaplama sonuçları, sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilenlerle karşılaştırılarak bunların iyi korelasyonlu ve önerilen yöntemin hesaplama iş yükündeki üstünlüğünü göstermişlerdir.

1.2. Tezin Bölümleri

Tez yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde deformasyon ölçmelerinin önemi gerekliliği hakkında bilgi verildikten sonra deformasyon araştırmaları ile alakalı yapılan bazı çalışmalar kısaca açıklanmıştır. İkinci bölümde deformasyon kavramının açıklaması ve çeşitlerinden bahsedilmiştir. Deformasyon ölçmelerinin hangi alanlarda kullanıldığı, deformasyona neden olan faktörleri açıklanmıştır. Deformasyon ölçmelerinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır ve bu yöntemlerin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlara değinilmiştir. Üçüncü bölümde deformasyonların belirlenmesi amacı ile kullanılan hem jeodezik hem de geoteknik yöntemler ve kullanılan aletler açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deformasyon ölçülerinin değerlendirilmesi amacı ile kurulan deformasyon modelleri açıklanmıştır ve bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra bu bölümde deformasyon analiz yöntemleri sıralanmıştır ve bu tez kapsamında kullanılacak olan S transformasyonu yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Beşinci bölümde ise paket programlar aracılığı ile gerçekleştirilen ve tezin önemli kısımlarından biri olan sonlu elemanlar yöntemi detaylı bir şekilde incelenmiş ve matematiksel modeli açıklanmıştır. Sonlu eleman, düğüm noktası gibi kavramlar açıklanmıştır daha sonra SEY ile analizde yapılan kabullerden ve çözüm aşamalarından kısaca bahsedilmiştir. Altıncı bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen uygulamada jeodezik analiz ve SEY ile analiz detaylıca anlatılmıştır. Yedinci ve son olan bölümde ise hazırlanan bu tez kısaca özetlenmiştir. Uygulama sonucu elde edilen sonuçlar irdelenmiştir ve mühendislik bakış açısı ile yorumlanmıştır.

2. DEFORMASYON ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Mühendislik ölçmelerinin önemli konularından biri de deformasyon ölçmeleri ve bu ölçülerin değerlendirilmesi konusudur. Büyük mühendislik yapılarında (tünel, baraj, yüksek katlı yapılar vb.), maden galerileri gibi riskli çalışma alanlarında ya da bu yapıların çevresinde meydana gelebilecek yatayda ve düşeydeki yer değiştirmeler “deformasyon” olarak adlandırılır (Atasoy ve Öztürk, 2005). Bu yer değiştirmelerin saptanabilmesi amacı ile gerçekleştirilen ölçmelere “Deformasyon Ölçmeleri”, yapılan ölçmelerin değerlendirilmesi ve anlamlı bir şekilde yorumlanması da “Deformasyon Ölçmelerinin Analizi” olarak adlandırılmaktadır. Meydana gelen şekil değişimlerinin yapı üzerindeki etkisine göre deformasyonları kalıcı ve geçici olarak ikiye ayırabiliriz. Bir cisme uygulanan kuvvet etkisi geçtiğinde cisim tamamen eski şekline dönüyorsa “geçici deformasyon” dönmüyorsa “kalıcı deformasyon” söz konusudur (Şekil 2.1) (İnal, 2022).



Şekil 2. 1. Deformasyon çeşitleri

2.1. Deformasyon Ölçmelerinin Amacı ve Uygulama Alanları

Deformasyon ölçmeleri, statik değerleri güvenliği tehdit edebilecek sınırlara ulaşmış büyük mühendislik yapılarında, zemin olarak doğru yere inşası yapılmamış tesislerde ve daha birçok alanda kullanımı yaygındır. Deformasyon ölçmelerindeki amaç, hareketi belirlenmek istenen objenin yatay ve düşey yöndeki değişimlerini saptamak veya şekil bozukluklarının periyodik ve sürekli olarak gözlenmesi ve yorumlanmasından ibarettir. Deformasyon ölçmeleri mühendislik projelerinin güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından önemli bir konuma sahiptir (Bülbül, 2013).

Deformasyon ölçmeleri, birçok mühendislik ve bilimsel disiplinlerde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin;

- İnşaat mühendisliğinde yapıların dayanıklılığını ve stabilitesini belirlemek için,
- Makine mühendisliğinde makine parçalarının montajı ve işletilmesi esnasında oluşabilecek deformasyonları belirlemek için,
- Yer ve kaya mekaniğinde temel problemler ve zemin stabilitesi gibi konularda,
- Jeolojide ve jeomorfoloji alanlarında ise deprem gibi doğal afetlerin izlenmesi ve yer kabuğunun hareketlerinin analizi için

deformasyon ölçmeleri gerçekleştirilebilir (İnal, 2022).

2.2. Deformasyonların Nedenleri

Yer kabuğundaki ve yapılardaki deformasyonlara;

- Tabandaki değişimler,
- Yer kabuğunda meydana gelen hareketler,
- Yapı temelindeki oturma ve kabarmalar,
- Nem, sıcaklık ve basınç, rüzgar

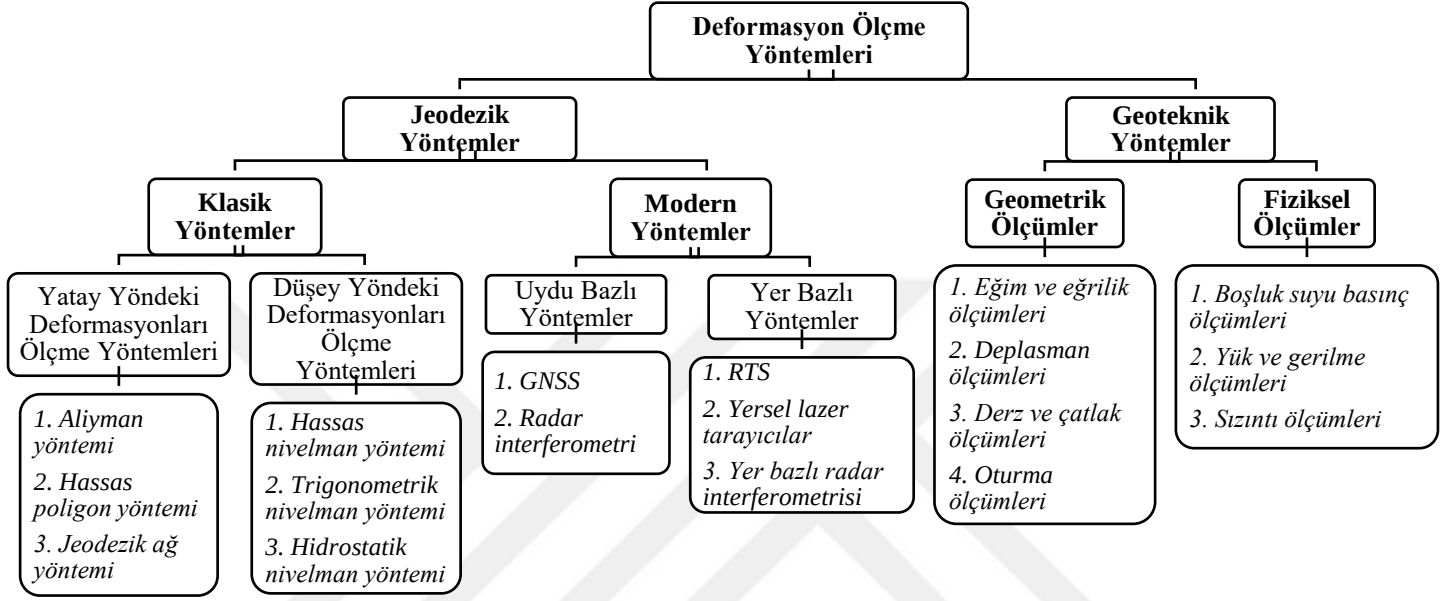
gibi olaylar sebep olabilir (İnal, 2022).

2.3. Deformasyon Ölçme Yönteminin Seçiminde Dikkat Edilen Hususlar

Deformasyon ölçme yöntemi seçilirken öncelikle ölçmesi gerçekleştirilecek objenin konumunun ulaşılabilir olup olmadığı, üzerinden geçilip geçilemediği ya da sadece gözlenebilir olup olmadığı gibi fiziksel erişim faktörleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanı sıra seçilmiş olan ölçme programının uygulanabilmesi için gereken zaman ve kaynaklarda dikkate alınması gereken koşullardandır. Obje noktaları ölçme yöntemine uygun olarak umulan deformasyonları yansıtabilecek şekilde seçilirler. İki ölçü serisi arasındaki zaman aralığı, deformasyonların hızına, büyüklüğüne ve yapıyı etkileyen faktörlerin değişimine bağlıdır. Periyodik hareketlerde iki ölçü serisi arasındaki zamanın belirlenmesinde, periyodik hareketin süresi önemli bir rol oynar ve her periyoda en azından iki ölçü süresi düşmelidir. Deformasyon ölçmeleri, çoğunlukla uzun bir zaman diliminde yavaş yavaş şekli değişen objeleri ele alır (İnal, 2022).

2.4. Deformasyon Ölçme Yöntemleri

Deformasyon ölçme yöntemleri jeodezik yöntemler ve geoteknik yöntemler olarak iki ana grupta incelenir. Mutlak deformasyonlar jeodezik yöntemlerle, bağıl deformasyonlar geoteknik yöntemlerle yardımıyla belirlenir. Her iki yöntemde kendi içinde çeşitli alt yöntemlere ayrılmaktadır (Şekil 2.2) (Bülbül, 2013)



Şekil 2. 2. Deformasyon ölçme yöntemleri (Alçay, 2014)

Jeodezik ve geoteknik yöntemleri karşılaştıracak olursak;

- Jeodezik yöntemler yalnızca deformasyon tespiti yapabilirken, geoteknik yöntemler deformasyon belirlemenin yanı sıra yük değerleri, gerilme ve boşluk suyu basıncı gibi parametreleri de ölçebilmektedir.
- Jeodezik yöntemler yüzey deformasyonları belirleme ile sınırlıyken geoteknik yöntemler bu sınırlamanın ötesinde yer altı deformasyonlarını da belirleyebilmektedir.
- Geoteknik ölçme cihazları yalnızca bağıl değişimler ölçülebiliyorken, jeodezik yöntemler mutlak değişimleri de tespit edebilmektedir.
- Geoteknik ölçme aletlerinin arızalanması gibi bir durumda onları yerinden çıkarıp tamir etmek genellikle mümkün olmazken, jeodezik ölçme aletlerinde böyle bir durum mümkün değildir kolaylıkla müdahale edilebilir.

bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantaja sahiptir (Alçay, 2014).

3. DEFORMASYONLARIN BELİRLENMESİNDE JEODEZİK ve GEOTEKNİK YÖNTEMLER

Büyük mühendislik yapılarında ve etki alanlarında farklı nedenlerden dolayı yer değiştirmeler bir diğer ifadeyle deformasyonlar meydana gelmektedir. Bunlar deprem, patlama, sel vb. dış etkiler ve yapının olduğu bölgedeki jeolojik oluşum, malzeme yapısı vb. iç etkiler olarak iki gruba ayrılabilir. Sözü edilen değişimlerin istatistiksel olarak incelenmesi önemlidir. Bu amaçla büyük mühendislik yapılarında meydana gelen değişimler jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenebilmektedir.

3.1. Jeodezik Yöntemler

Jeodezik yöntemler, klasik ve modern olmak üzere iki ana kategori altında değerlendirilir. Klasik yöntemler arasında yatay yöndeki deformasyonların tespiti için aliyman, hassas poligon ve jeodezik ağ yöntemleri; düşey yöndeki deformasyonların tespiti için hassas geometrik nivelman, trigonometrik nivelman ve hidrostatik nivelman yöntemleri kullanılarak belirlenir. Modern jeodezik yöntemler ise daha çok uydu ve yer bazlı yöntemler olarak ikiye ayrılır. Bu yöntemlerden uydu bazlı yöntemlere GNSS ve radar interferometri, yer bazlı yöntemlere ise RTS (Robotik Total Station), yersel lazer tarayıcılar ve yer bazlı radar interferometri örnek verilebilir (Alçay, 2014).

3.1.1. Aliyman yöntemi

Bu yöntem ile yatay yöndeki deformasyonlar bir doğrultu üzerinden kolaylıkla belirlenir. Deformasyon hangi yönde bekleniyorsa o yöne dik olarak aliyman doğrultusu seçilir. Aliyman yöntemi, sağlam bir zemin üzerine sabitlenen noktalara aliyman uç noktaları olarak referanslar alınarak uygulanır. Objelerin eşit aralıklarla yerleştirildiği aliyman doğrultusu boyunca teodolit bir uçta, gözlem levhası diğer uçta konumlandırılır. Aliyman doğrultusuna göre olan sapmalar, sapma açılarının ölçülmesi (açı yöntemi) veya doğrudan ölçmeler ile (direkt yöntem) belirlenir. Sabit noktadan uzaklaştıkça ölçünün hassasiyeti azalacağı düşüncesiyle, her iki metot da noktaların yarısının ölçüsü, aliyman çizgisini belirleyen noktalardan birinden, diğer yarısında öteki sabit noktadan yapılması uygun olur. Uzaklık kısa ise kaymaların tamamı doğrultunun her iki ucundan hesaplanabilir (İnal, 2022).

3.1.2. Hassas poligon yöntemi

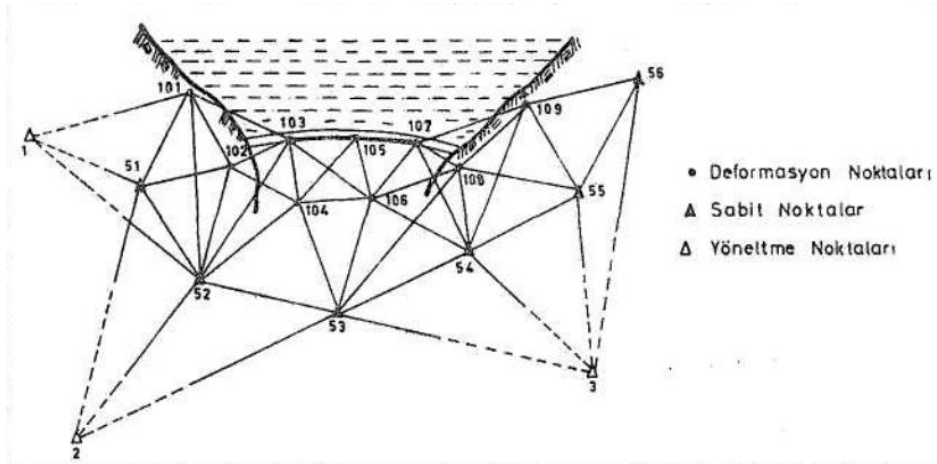
Ölçümü yüksek hassasiyet ile yapılan bir poligonun kenar ve açıları hassas olarak belirlenmiştir. Bu yöntem genellikle baraj deformasyonlarını izlemek için tercih edilir. Ölçme işlemi için sabit referans noktaları oluşturmak amacıyla noktalar kret üzerinde veya kontrol galerilerinde konumlandırılır. Poligon kenar uzunlukları genellikle 20-50 m arasında ve eşit olmalıdır. X eksenini geçki yönü olarak kabul edilirse, bunun dik olduğu eksen y eksenini olarak belirlenir. Bu şekilde y eksenini enine kaymayı temsil eder. Poligon noktalarının koordinatları en küçük kareler yöntemi (EKKY) kullanılarak hesaplanan dengeleme işlemiyle tespit edilir (İnal, 2022).

3.1.3. Jeodezik ağ yöntemi

Jeodezik ağ yöntemi, ölçmelerle birbirine entegre edilmiş noktalardan meydana gelir. Bu ağ içerisindeki noktalar şunlardır;

- Referans (kontrol) noktaları ($R_1, R_2, \dots$),
- Obje (deformasyon) noktaları ($O_1, O_2, \dots$),
- Yönelme noktalarından ($Y_1, Y_2, \dots$)

oluşmaktadır (Şekil 3.1) (İnal, 2022).



Şekil 3.1. Jeodezik deformasyon ağı

- **Referans (kontrol) noktaları**

Obje noktalarının yakınında tesis edilen ve üzerine alet kurmada herhangi bir engel bulunmayan ve obje noktalarının izlenebilmesi amacıyla seçilen noktalardır. Deformasyonların belirlenebilmesi için bu noktaların sabit yani hareketsiz olduklarının kanıtlanması gerekir.

– **Obje noktaları**

Bu noktalar deformasyon beklenen noktalar üzerinde tesis edilir. Barajlar için baraj gövdesinin mansap yüzeyine birbirine paralel sıralar halinde tesis edilir.

– **Yöneltme noktaları**

Hareketsiz oldukları kabul edilirler ve üzerlerinden herhangi bir gözlem yapılmayacağı için pilye ile inşa edilme zorunluluğu yoktur. Gözlem noktalarından yöneltme noktalarına geriden kestirme hesabı uygulanarak kayma olup olmadığı tespit edilir (İnal, 2022).

3.1.4. Hassas nivelman yöntemi

Düşey yöndeki değişimlerin belirlenmesi ile de ilgilenen deformasyon ölçmelerinde ölçülecek obje elverişliyse hassas nivelman yöntemi tercih edilir. Hassas nivelman;

- Baraj gövdesi ve çevresinde, köprü ayaklarında, bina ve yol çökmelerinde,
- Yer kabuğunda düşey hareketin belirlenmesinde

kullanılır. Yüksek hassasiyetli ölçmeler yapabilmek ve ölçme sonuçlarının doğruluğunu arttırmak için, muhtemel hata kaynaklarının belirlenmesi ve ortadan kaldırılması şarttır. Ölçmelerde birinci derece aletler kullanılmalı ve uygun gözlem yöntemleri uygulanmalıdır.

Hassas nivelmana etki eden hata kaynakları:

1. Yer ve mira eğikliği
2. Görüntü titremesi ve sallanması
3. Sıcaklık sebebi ile etkilenen mira ve nivo
4. Mira bölüm hataları
5. Eksen hatası
6. Yerin manyetik etkisi
7. Nivelman refraksiyonu
8. Yerçekimi

Hassas nivelmanda yüksek doğruluk elde etmek için;

1. Alet sağlam zemine kurulmalıdır,
2. Gözleme uzaklıkları eşit ve en fazla 30 m olmalıdır,

3. Refraksiyon etkisini azaltmak amacıyla alet olabilecek en yüksek seviyede kurulmalıdır,
4. Mira başlangıç hatasını önlemek için alet kurma sayısı çift olmalıdır ve hangi mira ile ölçmeye başlandıysa o mira ile ölçme bitirilmelidir,
5. Ölçme esnasında hava koşullarına dikkat edilmelidir. Yani aşırı sıcak havalarda değil ve mümkünse kapalı havalarda ölçme yapılmalıdır,
6. Tek taraflı çökmelere neden olmamak için ölçme kısa sürede bitirilmelidir,

koşullarına dikkat edilmelidir (İnal, 2022).

3.1.5. Trigonometrik nivelman yöntemi

Trigonometrik nivelman, iki nokta arasındaki yükseklik farklarının yatay uzaklık ve düşey açı kullanılarak belirlendiği bir yöntemdir. Eğer ölçülen mesafe 100 m'yi aşmıyorsa ve mesafe ölçmeleri yeterince hassas yapılmıyorsa bu yöntem deformasyon analizi için tercih edilebilir. Ancak doğrudan ölçülemeyen hedef uzaklıkları için nokta konumları önden kestirme yöntemi ile belirlenebilir (İnal, 2022).

3.1.6. GNSS Yöntemi ile Deformasyon Ölçmeleri

GNSS teknikleri jeodezik ağ yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen deformasyon ölçme analizlerinde ve nokta konumlarının saptanmasında yersel tekniklerin görevini üstlenmiştir. GNSS konumlandırma sistemleri mutlak ve görelî olmak üzere iki farklı yöntemle konum tespiti yapar. Görelî GNSS konumlandırma tekniğinde alıcılar tarafından gerçekleştirilen ölçmelerde yüksek hassasiyetli sonuçlar elde etmek için düzeltmeler veya post-proses uygulaması gerektirmektedir. Bu nedenle genellikle ticari yazılımlar tercih edilerek GNSS tekniği ile elde edilen statik ölçülerin değerlendirilmesi yapılır. Ancak, ticari yazılımların bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin baz uzunluklarının yaklaşık 600 kilometre ile sınırlı olması ve kullanıcı müdahalesine izin verilmemesi vb. GNSS tekniğinin bazı kısıtlamalarındandır. Bu sebeple, geliştirilen bilimsel GNSS değerlendirme yazılımları daha uzun mesafeli baz hatlarında analiz yapabilme ve çeşitli metodolojiler ve modellerin kullanılabilmesi imkanı sunmuştur. GNSS istasyonlarının yüksek doğruluklu konumlarını elde edebilmek için GIPSY, GAMIT ve BERNES yazılımları jeodezik amaçlı araştırmalarda sıkça tercih edilen üç ana bilimsel GNSS analiz yazılım paketidir (Bilgen, 2022).

3.2. Geoteknik Yöntemler

Geoteknik yöntemler fiziksel ve geometrik ölçmeler olarak iki alt kategoriye ayrılır. Fiziksel ölçmeler: boşluk suyu basıncı, yük ve gerilme, sızıntı ölçmeleri gibi faktörlerin tespitini içerir. Geometrik ölçmeler: eğim, eğrilik, deplasman, derz ve çatlaklar, oturma, yatay hareket ölçmeleri gibi parametrelerin ölçmelerini kapsar (Alçay, 2014).

3.2.1. Klinometre

Bu cihaz yapısal eğim değişikliklerinin izlenmesi için kullanılır. Tipik olarak beton barajlarda kullanılan sarkaç ölçme noktalarına yakın yerlere kurulur bu durum ölçülen değerlerin doğruluğunu karşılıklı olarak teyit edilmesine olanak sağlar (Alçay, 2014).

3.2.2. Çatlak, derz ölçer

Bu cihaz kaya kütlelerindeki çatlakların ölçmeleri ve beton barajlardaki derz açıklıklarının takibinde kullanılır. Cihaz, hareketin izleneceği açıklığın iki yanına monte edilen sabit uçlar aracılığıyla gerçekleşen değişim direkt olarak kayıt altına alır (Alçay, 2014).

3.2.3. Ekstensometre

Bu geoteknik cihaz yer değiştirmelerin tespiti amacıyla kullanılır. Çeşitleri arasında çubuk tipi, şerit tipi ve çok noktalı minyatürize edilmiş modeller bulunur. Genelde barajlarda galerilerinde ve destek noktalarında konumlandırılır, böylece kayaçların uzaması ve kısılması gibi hareketleri ölçülür (Alçay, 2014).

3.2.4. İnklinometre

İnklinometreler, sondaj deliklerine yerleştirilerek deliğin eksenine dik olan hareketleri ölçmek için kullanılır. Aletler deliğin her iki yanındaki eğimlerin konumunu, yönünü ve boyutunu tespit etmeye yararlar. Düşey yöndeki algılayıcılar ile yatay sapmalar, yatay yöndeki algılayıcılar ile düşeydeki şişme ve oturmaları ölçerler (Alçay, 2014).

3.2.5. Sarkaç

Sarkaçlar yatay hareketleri tespit etmek için kullanılan ölçme aletidir ve düz ve ters olmak üzere iki ana çeşidi vardır. Veriler genellikle otomatik olarak toplanır ve

okuma üniteleri tankın yanında yer alır. Sarkaç telinin ve koordinat ölçme cihazlarının doğruluğu barajdan beklenen hareket büyüklüğüne göre ayarlanır (Alçay, 2014).

3.2.6. Piyezometre

Piyezometreler suya doymuş ve yarı doymuş zeminlerde yeraltı su seviyesi, boşluk suyu basıncının takibinde kullanılan cihazlardır. Basınç değerlerini ölçerek riskli bölgeleri tespit etmeye ve tehlikeleri önlemede yardımcı olur (Alçay, 2014).

3.2.7. Debi ölçer

Bu cihaz yüksek basınçlı bölgelerdeki sondaj deliklerindeki akan suyun debisini ölçmek için kullanılırlar ve piyozometrelerin yüksek basınç gösterdiği noktalarda yer alırlar (Alçay, 2014).

3.2.8. Manyetik oturma kolonları

Bu cihaz zemindeki farklı derinliklerdeki oluşan düşey hareketleri tespit etmek için kullanılır. Sondaj kuyularına monte edilen oturma kolonları boru üzerine yerleştirilmiş manyetik halkalar içerir ve algılayıcı uç boru boyunca periyodik olarak indirilerek halkaların düşey konum değişikliklerini saptar (Alçay, 2014).

3.2.9. Yük hücresi

Bu cihazlar kaya kütlesi, istinat duvarı ve mesnet gibi yapı elemanlarında meydana gelen yük değişikliklerini otomatik olarak ölçer. Bu cihazların yanına çoğunlukla ekstensometreler yerleştirilerek elde edilen veriler teyit edilebilir (Alçay, 2014).

3.2.10. Basınç hücresi

Yapısal elemanlarda oluşan basınç seviyelerini ölçmek amacıyla kullanılan bu cihazlar toprak ve hidrolik basınç hücreleri olarak iki türde incelenirler (Alçay, 2014).

3.2.11. Teletermometreler

Yapıların sıcaklık değerlerini belirlemek amacıyla beton barajlara yerleştirilen bu cihazlar yardımıyla yapılar ile ilgili önemli bilgiler sağlanabilmektedir (Alçay, 2014).

4. DEFORMASYON ÖLÇÜLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Verilerin değerlendirilmesi ve elde edilen sonuçların doğru bir şekilde yorumlanması deformasyon araştırmalarının en önemli aşamasıdır. Değerlendirme aşamasında yanlış bir karar verilmesi sonucu oluşacak zararın büyük olması sebebiyle son derece dikkatli olunmalıdır.

Deformasyon araştırmasında, en az iki farklı zaman diliminde noktaların konumları belirlenir ve istatistik testlerle konum farklılıklarının büyüklüğü, yönü ve anlamlılığı incelenir.

Jeodezik ağın sıfır ve yineleme ölçüleri veya iki yineleme ölçüsü arasındaki farklar, ağın yapısına, ölçme planına ve ölçülerin duyarlılığına bağlı olarak "univaryant ağ" veya "multivaryant ağ" olarak adlandırılır. Deformasyon analizi univaryant ağlarda daha basit bir şekilde gerçekleştirilir (Bülbül, 2013).

Deformasyon incelemeleri, problemin tipine, boyutuna ve uygulanan ölçme yöntemlerine bağlı olarak çeşitli modellerle analiz edilebilir (İnal, 2022).

4.1. Deformasyon Modelleri

Deformasyon ölçülerinin analizi için farklı modeller kullanılmaktadır. Bu modeller, tasvirsel ve etki-tepki modelleri olarak iki ana başlıkta incelenir. Tasvirsel modeller deformasyon sürecinin etkilerinin izlenmesine dayanırken etki-tepki modelleri incelenen objenin sürece verdiği tepkileri ve süreci etkileyen büyüklükler arasındaki ilişkiyi analiz etmeyi amaçlamaktadır. Tasvirsel modeller, uyum modelleri ve kinematik modeller olmak üzere ikiye ayrılır ve objeye etkileyen kuvvetleri hesaba katmadan analiz yaparlar.

Etki-tepki modelleri, objeye etki eden kuvvetleri (örneğin sıcaklık, yer çekimi) dikkate alır ve etkileriyle birlikte incelenen objenin bu etkilere verdiği tepkileri analiz eder. Etki-tepki modelleri, statik ve dinamik modeller olarak da ayrılır. Bu modeller, deformasyon sürecindeki farklı etkilerin yönünü belirlemeyi ve analiz yapmayı amaçlamaktadır. (Bilgen, 2022).

4.1.1. Uyum modeli

Uyum modeli, deformasyon analizinde objenin farklı periyotlardaki durumlarını geometrik olarak zamandan ve etkileyen kuvvetlerden bağımsız olarak karşılaştırmaktadır. Kurulan sıfır hipotezi "Her iki periyotta karakteristik noktalardan oluşan objeler birbirine

benzer" olarak tanımlanır ve objenin iki farklı durumu doğrusal bir hipotez testiyle karşılaştırılır. Deformasyonun anlamlı olabilmesi için sıfır hipotezinin geçerli olmaması gerekmektedir. Deformasyonların yerleştirilmesi işlemi sonrasında sabit ve hareketli noktalar belirlenir. Bu adımda, farklı kısımları incelenen objenin deformasyonlarını daha doğru bir şekilde analiz etmek için noktaların doğru seçilmesi önemlidir (Bilgen, 2022).

4.1.2. Kinematik model

Kinematik modeller, belirli bir objeye ait noktaların hareketini ve bu hareketlerin hızlarını belirlemek için oluşturulan modellerdir. Zamanın bir fonksiyonu olan kinematik modeller objeye uygulanan kuvvetleri göz ardı edip objenin yatayda ve düşeydeki hareketlerini hız ve ivme yoluyla belirlemektedir (Heunecke ve Welsch ,2001; Bülbül, 2013). Kinematik model, özellikle tekrar sayısı yüksek iken veya deformasyon analizi yapılan obje noktasının bir periyot boyunca ölçme süresi arttığında kullanılmaktadır. Örneğin ülke nivelman ağına ait ölçüler kullanılarak yerkabuğu hareketleri saptanmak istenirse bu ölçmeler 3-4 yılda tamamlanmaktadır. Nivelman noktaları bu süreç boyunca sabit kalmayacağından noktalara ait düşey yöndeki hareketleri zamana bağlı olarak ele alınıp düşey yöndeki değişimlerin hızları irdelenir (Bülbül, 2013; Bilgen 2022).

4.1.3. Statik model

Statik model, deformasyon analizleri zaman ve objeye gelen yüklerden ayrı olarak gerçekleştirilmektedir. Statik deformasyon analizinde objeler üzerindeki noktaların yer değişim miktarları gibi kısıtlı değerler kullanılır (Doğanalp ve ark., 2009). Statik modelde deformasyonlar zaman ve kuvvetler göz ardı edilerek belirlendiğinden dolayı obje noktalarının her iki periyota ait ölçmelerinde sabit kaldıkları varsayılmaktadır. Objeye ait belirlenen hareketler yüklerin bir fonksiyonu olup zaman faktörü göz önünde bulundurulmadan değerlendirilir. Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde en çok tercih edilen modeldir (Bilgen, 2022)

4.1.4. Dinamik model

Dinamik model, objenin hareketlerini zaman ve etkiyen kuvvetlere bağlı olarak uygun bir fonksiyon ile tanımlar ve bu durum dinamik modelin temelini oluşturur. Dinamik model statik modelin sabit durum analizini ve kinematik modelin zamanla değişen hareket analizi özelliklerini bir araya getirmektedir. Statik modelin aksine

dinamik modelde obje, ölçmeler yapılırken hareket etmektedir. Bu durum sürekli ve otomatik gözlem yöntemlerinin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Dinamik model, bir sistemin tüm yönleriyle tanımlanmasını sağlayarak en kapsamlı ve geniş çaplı model türüdür. Dinamik model parametrik ve parametrik olmayan model olarak iki bölümden oluşmaktadır (Heuncke ve Welsch ,2001; Bilgen, 2022).

4.2. Deformasyon Modellerinin Karşılaştırılması

Deformasyonların belirlenmesinde yükün, kuvvetin, zamanın etkisi dikkate alınması gerekir. Yani Deformasyonlar, problemin şekline, kapsamına ve uygulanan ölçme yöntemlerinin türüne, hareketin zamandan ve kuvvetten bağımsız olup olmamasına göre değişik modeller kullanılarak incelenir.

Uyum modelinde sadece geometrik karşılaştırma ile analiz yapılırken (zamandan ve etkiyen kuvvetlerden bağımsız) kinematik modellerde zaman içindeki hız ve ivme değişimi de modellenerek zamana bağlı fonksiyon ortaya çıkmaktadır. Statik model, objeye ait belirlenen hareketler yüklerin bir fonksiyonu olup zaman faktörü göz önünde bulundurulmadan değerlendirilir. Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde en çok tercih edilen modeldir. Dinamik model en geniş modeldir. Statik model ile kinematik modelin birleştirilmiş halidir. Statik modelin sabit durum analizini ve kinematik modelin zamanla değişen hareket analizi özelliklerini bir araya getirmektedir (Bülbül, 2013; Bilgen, 2022).

Çizelge 4. 1 Deformasyon modellerinin sınıflandırılması (Heuncke ve Welsch, 2001)

Deformasyon Modeli	Kinematik Model	Statik Model	Dinamik Model	Uyum Modeli
Zaman faktörü	Hareketler zamanın bir fonksiyonudur.	Modelleme yok	Hareketler zamanın ve yüklerin bir fonksiyonudur.	Modelleme yok
Kuvvet faktörü	Modelleme yok	Yer değiştirmeler yüklerin bir fonksiyonudur.		Modelleme yok
Objenin durumu	Sürekli hareket halinde	Yük altında yeterli miktarda değişim	Sürekli hareket halinde	Yeterince dengede

4.3. Deformasyon Analiz Yöntemleri

Deformasyon analizinde kullanılan yöntemler;

- θ^2 ölçütü (Ortalama aykırılıklar yöntemi) ile deformasyon yöntemi
- Bağlı güven elipsleri yöntemi ile deformasyon analizi
- S transformasyonu ile deformasyon analizi
- Mierlo yöntemi ile deformasyon analizi

- Cholesky çarpanlara ayırma yöntemi ile deformasyon analizi
- Kinematik modeller ile deformasyon analizi

şeklinde. Bu yöntemler kullanım kolaylığı, ağ yapısı, ölçme planı vb. açısından bazı farklılıklara sahiptir. Ayrıca deformasyon analizleri kullanılan ağın boyutuna (1D, 2D, 3D) göre de yöntemlerin kullanımı değişmektedir. Örneğin; Bağlı güven elipsleri yöntemi, Cholesky çarpanlara ayırma yöntemi sadece 2D ağlarda kullanılabilirken, S transformasyonu yöntemi ise 1D, 2D ve 3D ağlarda kullanılabilir. Benzer şekilde Bağlı güven elipsleri yöntemi sadece 2D ağlarda kullanılmasına rağmen grafik olarak da yorumlanabilmesi bu yöntemin ayrıca üstün bir yanıdır. Bu tez kapsamında 1D, 2D ve 3D ağlarda kullanılabilen S transformasyonu yöntemi bu bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.3.1. S transformasyonu yöntemi ile deformasyon analizi

Baarda'nın geliştirdiği bu yöntem sayesinde bir datumdan başka bir datuma yeni bir dengeleme yapmaya gerek kalmaksızın geçilebilir. Diğer bir deyişle, tüm iz, kısmi iz minimum ve klasik dengeleme durumları arasında geçiş yapmak mümkündür. Bu yüzden programlama açısından da oldukça kullanışlı ve verimli bir yöntemdir (Doğanalp, 2005).

S-transformasyonu, deformasyon ölçmelerini analiz etmek, ağları duyarlık bakımından karşılaştırmak, kontrol ağlarının beklenen doğruluğunu belirlemek, koordinat bilinmeyenlerinin varyans-kovaryans matrisi, öngörülen yapay kovaryans matrisi ile karşılaştırılmak üzere kullanılır ve bu işleme ölçüt matris analizi denir (Demirel, 1987; İnal ve Ceylan, 2002; İbaoğlu, 2019).

S-transformasyonu yönteminde periyot ölçüleri ayrı ayrı serbest dengelenir ve uyumsuz ölçüleri ayıklanır. Periyot ölçüleri için uyuşum testi yapılır. İlk olarak ağın bütününde deformasyon olup olmadığını belirlemek için global bir test yapılır. Daha sonra deformasyonun hangi bölgede olduğunu belirlemek için yerleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir (İbaoğlu, 2019).

Eğer t_1 ve t_2 zamanlarında gözlemlenen ağ yapıları farklılık gösteriyorsa (multivaryant ağ) global test sadece eşlenik noktaları içeren ağ kesimlerini içerir. Yani t_1 ve t_2 zamanlarında ölçmeler, eşlenik noktalar baz alınarak düzenlenir.

t_n zamanında ölçmesi gerçekleştirilen bir ağ içerisinde "e" ile işaretlenmiş eşlenik (datum) noktalarının koordinatları öncelikli sırada yer alırken, "b" ile işaretlenmiş diğer noktaların koordinatları ve diğer bilinmeyenler ise herhangi bir i datumu için yapılan serbest dengeleme sonucunda ikinci sırada belirlenir. Bu duruma göre, i datumu ilgili x_i parametreler vektörü ve ağırlık katsayıları matrisi;

$$x_i = \begin{bmatrix} x_e^i \\ x_b^i \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

olarak alt vektörlere bölünür.

x_e^i : Eşlenik noktalara ait koordinat bilinmeyenleri

x_b^i : Diğer noktalara ait koordinat bilinmeyenleri

ifade etmektedir.

Ağırlık katsayıları matrisi

$$Q_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ee}^i & Q_{eb}^i \\ Q_{be}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

olarak belirlenir (Doğanalp, 2005).

S-transformasyon analizi uygulamaları sırasında S dönüşüm matrisi,

$$S = I - G(B^T G)^{-1} B^T \quad (B = E.G) \quad (4.3)$$

denklemleri kullanılarak elde edilir. I birim matrisi temsil ederken, G normal denklemlerin katsayılar matrisidir ve N matrisinin d defekt sayısına sahip özdeğerlerine karşılık gelen özvektörler matrisini ifade eder (İbanoğlu, 2019).

S-transformasyon matrisi kullanılarak bir i datumunda dengeleme sonuçları j datumunun

$$X_j = S_j X_i \quad (4.4)$$

$$Q_{xx}^j = S_j Q_{xx}^i S_j^T \quad (4.5)$$

denklemleri ile dönüşümü gerçekleştirilir.

Eşlenik noktalara ait gerçekleştirilen global test için

$$H_0 : E(x_e^j)_1 = (x_e^j)_2 \quad (4.6)$$

$$d_e = (x_e^j)_2 - (x_e^j)_1 \quad (4.7)$$

$$(Q_{dd})_e = (Q_{ee}^j)_1 + (Q_{ee}^j)_2 \quad (4.8)$$

$$R_e = d_e^T (Q_{dd})_e^+ d_e \quad (4.9)$$

ve R_e nin serbestlik derecesi h_e olarak tanımlanır ve $u_e - d$ ile hesaplanır. Test büyüklüğü ise;

$$F = \frac{R_e}{m^2 h_e} \quad (4.10)$$

ile ifade edilir. $F > F_{he,f,1-\alpha}$ ise ağ üzerinde deformasyon olduğu anlamına gelmektedir (Doğanalp, 2005; İbanoğlu, 2019).

S transformasyonu yardımıyla anlamlı nokta hareketlerinin araştırılması

Global test sonuçlarına göre ağda deformasyon tespit edilirse, hareketli noktaların incelenmesi gerekmektedir. Eşlenik noktaların her birinin yer değiştirmiş olabilir; bu

nedenle i datumunda serbest dengeleme yoluyla tespit edilen bir döneme ait (4.1) parametreler vektörü ve (4.2) ağırlık katsayıları matrisi, alt vektörler olarak uygun şekilde sınıflandırılır (Doğanalp, 2005; İbaoğlu, 2019).

$$x_i = \begin{bmatrix} x_s^i \\ x_h^i \\ x_b^i \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

x_s^i : Sabit kabul edilen eşlenik noktalara ait koordinatlar

x_h^i : Hareketli kabul edilen eşlenik noktalara ait koordinatlar

x_b^i : Eşlenik olmayan noktalara ait parametre ve bilinmeyenler

$$Q_{xx}^i = \begin{bmatrix} Q_{ss}^i & Q_{sh}^i & Q_{sb}^i \\ Q_{hs}^i & Q_{hh}^i & Q_{hb}^i \\ Q_{bs}^i & Q_{bh}^i & Q_{bb}^i \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

t_n zamanında elde edilen ölçmelerle oluşturulan ağ, x_s koordinatlarında toplanan ve sabit olarak kabul edilen noktalara göre yerleştirilir. Eğer bu datum k ile ifade ediliyorsa, (4.11) ve (4.12) numaralı denklemlere göre ayırım yapılır ve;

$$G = \begin{bmatrix} G_s \\ G_h \\ G_b \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad B_k = E_k G = \begin{bmatrix} G_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

S_k transformasyon matrisinin belirlenmesi gerekmektedir ve her bir tekrar için;

$$x_k = S_k \cdot x_i \quad (4.14)$$

$$Q_{xx}^k = S_k \cdot Q_{xx}^i \cdot S_k^T \quad (4.15)$$

transformasyonu uygulanmalıdır. Sabit olarak varsayılan noktaların koordinat farklılıkları ve bu farklılıkların ağırlık katsayıları matrisi;

$$d_s = (x_s^k)_2 - (x_s^k)_1 \quad (4.16)$$

$$(Q_{dd})_s = (Q_{ss}^k)_1 + (Q_{ss}^k)_2 \quad (4.17)$$

ile hesaplanır.

Artım miktarı,

$$R_s = d^T (Q_{dd})_s^{-1} d_s \quad (4.18)$$

ile hesaplanır.

Eğer global test sonucunda ağın belirli bir bölgesinde deformasyon tespit edilmişse, en düşük $(R_s)_{\min}$ değerine sahip noktadaki hareket anlamlı olarak kabul edilir.

$$F = \frac{R}{m_0^2 h_s} \quad (4.19)$$

ile test büyüklüğü hesaplanır. Test büyüklüğü olan F tablo değeri olan $F_{h,f,1-\alpha}$ değerinden büyük çıkıyor ise ilgili noktada %95 olasılık ile deformasyon vardır denir. Bu durumda

diğer eşlenik noktalar için test yinelenir ve hareketli noktaların saptanmasına devam edilir (Doğanalp, 2005; İbaoğlu, 2019).



5. SONLU ELEMENLARLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yönteminin matematiksel temelleri Lord Rayleigh (1842-1919)-İngiliz, Boris Grigorievich Galerkin (1871-1945)-Rus, Walther Ritz (1878-1909)-Alman, Richard Courant (1888-1972)-Alman, Alexander Hrennikoff (1896-1984)-Rus, tarafından atılmıştır. İlk bilgisayarın ortaya çıkması ile halen günümüzde vazgeçilmez bir nümerik analiz metodu olan Sonlu Elemanlar Yöntemi ile ilgili ilk yayın: “M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin and L. J. Topp, "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures," J. of Aero. Sci., 23 (9), Sept. 1956” dır. Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu) adını ilk kez Ray W. Clough “The finite element method in plane stress analysis” çalışmasında kullanmıştır (Topçu, 2015).

Kavramsal olarak sonlu elemanlar fiziksel bir anlama sahip olduğundan yüzyıllardır birçok alanda kullanılmıştır ve kullanımı giderek artmıştır. Sonlu elemanlar kavramının ana fikri geometrik olarak karmaşık olan bir problemin sonlu sayıda geometrik olarak daha basit alt problemlere çevrilerek temsil edilmesidir. Basit probleme dönüştürülerek çözülen problemin sonucu karmaşık olan problemin sonucunu yeterli seviyede bir yaklaşıklıkla yansıttığı kabul edilir ve sonlu elemanlar yönteminin mantığı bu kabule dayanır.

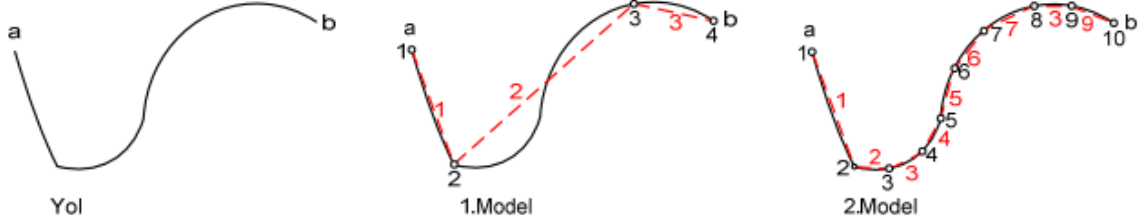
Sonlu elemanlar yöntemi, komplike yapıları kolaylıkla modelleme imkanı, kullanılan malzemelere ait özellikler ve sınır koşullarının farklılığını uyumlu şekilde ele alabilme kabiliyeti nedeniyle çok yönlü ve kullanımı kolay bir analiz yöntemidir. Bu yöntem sayesinde gelişmiş analizler yapmak mümkündür (Ghafaria ve ark., 2016).

Aşağıda sonlu elemanlar yönteminin bazı mühendislik alanlarındaki uygulamalarına yönelik örnekler verilmiştir (Çizelge 5.1)

Çizelge 5. 1. Sonlu elemanlar yönteminin bazı mühendislik alanlarında uygulamaları

Çalışma Alanı	Denge Problemleri
•Yapı Mühendisliği, Yapı Mekaniği	•Kabuk, Kiriş ve Disklerin Analizi •Kompleks ve karmaşık yapıların analizi •İki ve üç boyutlu gerilme analizi •Prizmatik bölümlerin burulması
•Zemin Mekaniği, Temel Mühendisliği	•Yapı ve kazı problemleri •Şev stabilitesi problemleri •Zemin yapı etkileşimi •Barajların, tünellerin analizi
•Hidrolik ve Su Kaynakları	•Akışkanların potansiyel akım için çözümü •Akışkanların viskoz akım için çözümü •Akiferlerde ve poroziteli ortamlarda düzgün hızlı akış durumu •Barajların ve hidrolik yapıların analizi

Sonlu elemanlar yönteminin ana ilkesi bir sistemi probleme uygun olarak “sonlu elemanlar” olarak adlandırılan alt bölgelere ayırarak oluşan bu elemanları çözüm sonrası birleştirmesidir. Bu alt bölgelere ait olan elemanlar “düğüm noktaları” olarak adlandırılan kesişimlerden oluşur. Karmaşık olan bütünün sonlu sayıda elemana ayrılmasına "Sistemin modellenmesi" denilmektedir (Şekil 5.1) (Topçu, 2015).



Şekil 5. 1. Sonlu elemanların modellenmesine yönelik bir örnek

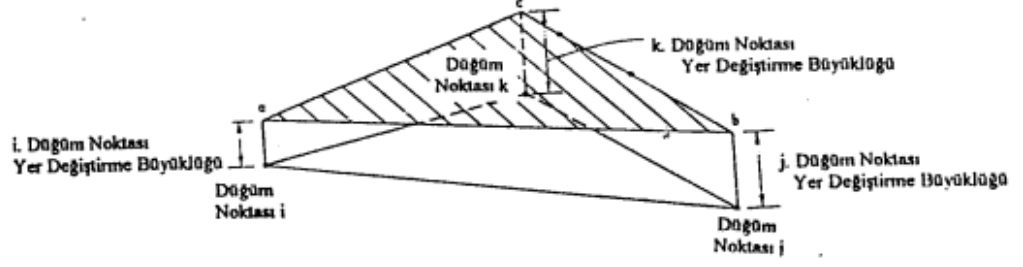
Sonlu elemanlar yöntemi temel olarak bu örnekteki şekildedir. Karmaşık olan yapı çubuk, üçgen, dörtgen gibi alt parçalara ayrılır, bu parçaların çözümü yapılır ve bu parçalar birleştirilerek bir bütün olarak çözümü gerçekleştirilir.

Sonlu elemanlar yöntemi temel olarak dört ana çalışmadan oluşur. Bunlar; sonlu elemanlar varsayımının geliştirilmesi, bir bütün olan problemi alt parçalarına ayırarak sonlu elemanlar problemine çevirmek, bilgisayar yazılımlarının oluşturulması ve problemin çözümü amacıyla gereken dataların elde edilmesidir. Gerçeğe en yakın sonuca ulaşmak için bu dört temel konuda dikkatli ve koordineli bir şekilde çalışmak gereklidir. Sonlu elemanlar yönteminin teorisi ise iki kısma ayrılır; ilk kısım “tekil elemanları”, ikinci kısım ise tüm cismi temsil eden “elemanlar topluluğunu” inceler (Şenel, 1996).

Matris yöntemler, yapıların çubuklardan oluştuğu durumlarda kullanılırken, kabuk, plak ve baraj gövdesi gibi yapıların analizi yapılırken yapay düğüm noktaları kullanılır. Bu yöntemde her eleman kendi içinde ayrı ayrı formülize edilerek analiz yöntemi sadeleştirilir. Alt elemanlar gerçek yapının özellikleri ile benzer özellik gösterir. Her elemanın düğüm noktalarında belirli serbestlik dereceleri tanımlanır ve eleman davranışları bu serbestlik derecelerini içeren denklemler ile ifade edilir. Düğüm noktalarında sınır şartları sağlanarak matematiksel model oluşturulur. Bu yöntemde yapı sonsuz serbestlik derecesi olan bir ortamdan sonlu serbestlik derecesine dönüşür. Her elemanın sadece düğüm noktaları ile diğer elemanlara bağlı olduğu ve deformasyonların yalnızca düğüm noktalarından bulunduğu kabul edilir (Çarhoğlu, 2011).

Her sonlu eleman için gerçek yer değiştirmelerin dağılımları ve değişimleri basit fonksiyonlar olarak seçilir ve “yer değiştirme fonksiyonları” veya “yer değiştirme

modelleri” olarak adlandırılırlar. Bu modellerdeki bilinmeyen büyüklük, düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerdir (Şekil 5.2) (Şenel, 1996).

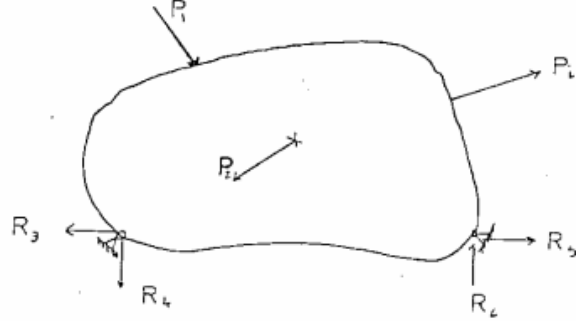


Şekil 5. 2. Üçgen bir elemanın lineer yer değiştirme modeliyle çizilmiş üçüncü boyutunun izometrik görünüşü (Şenel, 1996)

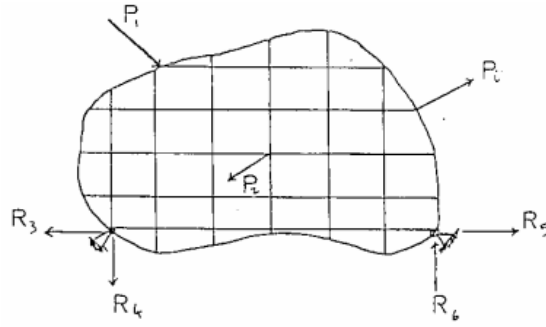
Bu alt elemana ait özellikleri ile gerçek sürekli yapının özellikleri benzer davranış sergilerler. Gerçekte birbirlerine sonsuz sayıda nokta ile bağlı olan bu elemanlar sonlu elemanlar yöntemi ile elemanların birbirine yalnızca düğüm noktaları ile bağlı olduğu kabul edilir. Sonlu elemanların şekil ve boyutu işlem için beklenen hassasiyete ve uygulayıcının inisiyatifine göre belirlenir. Sürekli yapı büyük boyutlu elemanlara sahip olursa sonuçlar gerçeği bir o kadar az yansıtırken, çok sayıda ve küçük elemanlara bölünürse bir o kadar gerçek sonuçlara yaklaşılr. Ancak ne kadar çok eleman olursa bir o kadar da uzun zaman ve bilgisayar belleğine ihtiyaç duyulur. Bu yöntem için eleman şekli ve boyutunun belirlenebilmesi özel uzmanlık gerektirir. Küçük boyutlu elemanları genellikle gerilmenin büyük olacağı düşünülen bölgelerde kullanırken diğer kısımlar için büyük boyutlu elemanlar kullanılmalıdır. Gerilmenin çok olduğu bölgelerde küçük boyutlu eleman tercih edilmesinin sebebi her yükün etkilediği noktada bir düğüm noktasının bulunmasını sağlayabilmektir. Bu sayede sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip bir ortam, sonlu sayıda serbestlik derecesi olan bir ortama dönüştürülür bu modele yapısal sonlu eleman modeli adı verilir (Bayraktar, 1991).

Malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde girilmesi en önemli adımdır. Bu parametreler sonuçları etkileyeceğinden dolayı doğru girilmelidir. Analizi gerçekleştirilecek yapıya uygun deneysel çalışmalar, malzeme parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olabilir. Sonlu elemanlar ağının oluşturulması ise malzeme değerlerinden sonra en mühim adımdır. Bu aşamaya ayrıklaştırma da denir. Otomatik olarak sonlu elemanlar ağı oluşturmak amacı ile ilgili komut sonlu elemanlar yazılımlarının birçoğunda bulunmaktadır. Analiz sonuçlarını etkileyen bir diğer faktör de eleman boyutlarıdır. Sonlu eleman ne kadar küçükse sonucun doğruluğu artarken, ne

kadar büyükse de doğruluğu bir o kadar azalmaktadır. Eleman boyunun küçük seçilmesindeki dezavantaj ise analizin süresini arttırmasıdır (Aydın, 2021).



Şekil 5. 3. Düzlem gerilme problemi



Şekil 5. 4. Sonlu eleman modeli

Sonlu Eleman Metodunda Temel Çözüm Adımları;

- Eleman rijitlik matrisi oluşturma.
- Koordinat dönüşümü ve yapı rijitliği.
- Yük vektörünün oluşturulması.
- Lineer denklem sisteminin kurulması ve çözümü (Benli, 1996).

Yapılan Kabuller;

- Yapının deforme olmuş halindeki yer değişimleri uygulanan kuvvetlerle doğrusal orantılıdır bu ilkeye Hooke yasası denir.
- Yapıyı etkileyen kuvvetler etkisinde meydana gelen deplasmanlar küçük ve doğrusaldır.
- Yapı üzerindeki her noktada geometri ve malzeme özellikleri sabittir.
- Kabuk eleman için plak kalınlığı diğer boyutlara kıyasla küçük ve yüklenmiş plak orta kesiti düz bir çizgi üzerinde yer alır (Benli, 1996).

Sonlu elemanlar yöntemi günümüzde, matematiksel modellerin ayrıklaştırılması ve bu ayrık modellerin bilgisayar ortamında çözülmesi için en geniş kapsamlı ve evrensel olarak kabul edilen yöntemdir. Klasik sonlu farklar yönteminden temel ayrımı, sınır değer

problemlerine değil, varyasyonel problemlere odaklanmasıdır. Bu özelliği ile SEY, bilimsel ve teknolojik problemlerin sayısal çözümlemesinde öncü yöntemler arasında yer alır. SEY'in disiplinler arası yapısının genişliğini vurgulamak için matematiksel analiz, diferansiyel denklemler, sayısal yöntemler, bilgisayar bilimleri, mühendislik bilimlerinin çeşitli alanlarıyla entegrasyonunu belirtmek yeterlidir (Doctors, 1970).

Üç boyutlu modelin sonlu eleman analizinde oluşturulabilmesi için elemana ait bir noktadaki x , y ve z koordinatları, düğüm noktalarının koordinatlarına dayalı geometrik enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak

$$\begin{aligned} x^e &= \sum_{i=1}^n h_i x_i^e \\ y^e &= \sum_{i=1}^n h_i y_i^e \\ z^e &= \sum_{i=1}^n h_i z_i^e \end{aligned} \quad (5.1)$$

formülü ile hesaplanır. Bu bağlamda; x^e, y^e, z^e ifadesi, sonlu elemana ait bir noktanın koordinatları için kullanılırken; x_i^e, y_i^e, z_i^e n düğüm noktalı elemanın i. düğüm noktasının koordinatlarını temsil etmektedir. h_i , enterpolasyon fonksiyonlarını belirtir ve bu fonksiyonlar her bir değişkeni -1 ile +1 arasında değiştiği yerel eksenler üzerinde tanımlanır.

Benzer bir biçimde, bir elemanın herhangi bir noktasında meydana gelen deformasyonun x , y , z eksenlerine göre bileşenleri (U_x, U_y, U_z) olarak tanımlanır ve bu bileşenler düğüm noktası deformasyonlarına dayalı olarak,

$$\begin{aligned} U_x &= \sum_{i=1}^n h_i U_{xi}^e \\ U_y &= \sum_{i=1}^n h_i U_{yi}^e \\ U_z &= \sum_{i=1}^n h_i U_{zi}^e \end{aligned} \quad (5.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada; x , y ve z eksenlerindeki düğüm noktası deformasyonlarını temsil eden $U_{xi}^e, U_{yi}^e, U_{zi}^e$ ile ifade edilen n düğüm noktalı bir elemanın izoparametrik sonlu eleman yöntemi kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem aynı enterpolasyon fonksiyonlarının hem koordinat hem de deformasyon hesaplamalarında kullanılmasını sağlar. Sonlu eleman yönteminin bu kritik özelliği sayesinde, bir yapının herhangi bir elemanındaki deformasyonlar, düğüm noktası deformasyonlarına dayanarak enterpolasyon fonksiyonları ile ifade edilebilir. Bu fonksiyonlar kullanılarak, elemanın düğüm noktası kuvvetleri ile düğüm noktası deformasyonları arasındaki ilişki eleman rijitlik matrisi ile ifade edilir.

Sayısal çözüm için, düğüm kuvvetleri ve düğüm yer değiştirmeleri arasındaki ilişki için aşağıdaki denklemle yazılabilir;

$$F=KU \quad (5.3)$$

Burada F, sistemin dış yük (düğüm kuvvetleri) vektörünü; U, deformasyon (düğüm yer değiştirmeleri) vektörünü göstermektedir (Žvanut, 2022).

K sisteme ait rijitlik matrisidir ve,

$$K = \sum K^e \quad (5.4)$$

şeklinde K^e elemana ait rijitlik matrislerinin toplamı şeklinde ifade edilir.

Düzlem şekil değiştirme analizlerinde genelde bölgenin bir kısmı ele alınır ve çözüm bu kapsamda gerçekleştirilir. Bu tür problemlerde X-Y düzlemindeki katı cisimlerin bir bölümü üzerinden yapılan incelemelerle yer değiştirmeler ve gerilmeler tespit edilir. Düzlem şekil değiştirme koşulları altında birim şekil değiştirme bileşenleri, (5.5) numaralı denklemlerle ifade edilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.5)$$

İki boyutlu bir çözümde elastik, homojen ve izotropik bir malzeme için Hooke Yasası belirli bir denklemle ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\eta)(1-2\eta)} \begin{bmatrix} 1-\eta & \eta & 0 \\ \eta & 1-\eta & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}-\eta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.6)$$

Burada, η poisson oranıdır (Taşçı ve ark., 2004)

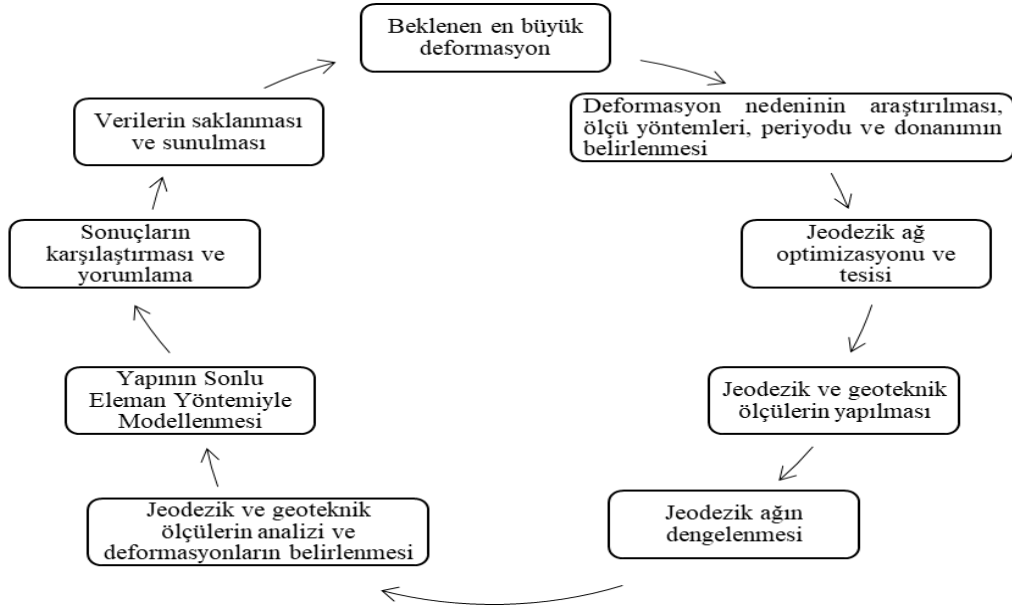
Sonlu elemanlar yöntemi, diğer analiz yöntemlerine kıyasla bazı avantajlara sahiptir:

- Sonlu elemanların, boyut ve şekil bakımından esnekliğe sahip olması nedeniyle, karmaşık yapıların bile güvenilir bir şekilde temsil edebilir,
- Çok bağlantılı veya köşeli bölgeler gibi karmaşık geometriler bu yöntemle kolaylıkla incelenebilir,
- Farklı malzeme ve geometriye sahip problemler sonlu elemanlar yöntemi ile ek zorluk oluşturmada ele alınabilir. Malzeme ve geometri nonlineeriteleri, kalıtsal özellikleri dahil kolayca dikkate alınabilir,
- Sebep-sonuç ilişkileri, sistem rijitlik matrisi aracılığıyla genelleştirilmiş "kuvvetler" ve "yer değiştirmeler" cinsinden formüle edilebilir,
- Sınır şartları, sonlu elemanlar yöntemi ile kolaylıkla uygulanabilmesi,

- Sonlu eleman yöntemi, çok yönlülüğü ve esnekliği sayesinde karmaşık yapılar, sürekli ortamlar ve diğer çeşitli problemlerde sebep sonuç ilişkilerini hesaplamada son derece etkilidir ve analitik ile deneysel yöntemlere göre daha hassas sonuç sunabilir (Satır, 2007).

Sonlu elemanlar yönteminde, doğru element tipini seçmek analiz işleminin çok önemli bir parçasıdır. İncelenen cismin geometrisi, analiz türü (mukavemet, ısı transferi, manyetik analiz gibi) ve sınırlamalar, eleman belirlemeyi doğrudan etkiler. Çözümü aranan yapıya ait problemin geometrik yapısı sonlu eleman yöntemine dayalı bir yazılım programı ile ya da bilgisayar destekli çizim programları ile tasarlanabilir. Analiz sürecinde ağ sistemi kurmak, sonlu eleman yönteminin temelini oluşturur. Bu işlem sırasında, düğüm noktaları ve elemanların koordinatları belirlenir. Ayrıca kullanıcının girdiği en optimum bilgiye dayanarak düğüm noktalarını ve elemanları otomatik olarak sıralayıp numaralandırmak için optimum sürede işlem yapılmasını sağlar (Satır, 2007).

Zaman içerisinde mühendislik yapılarındaki meydana gelebilecek şekilsel değişiklikler ve bu değişikliklere sebep olan faktörlerin takibinde kullanılan teknik, ekipman, ölçme ve analiz işlemleri deformasyon ölçmesi alanına dahildir. Deformasyonların Jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yöntemi ile izlenmesinde genel adımlar Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 5. Deformasyonların Jeodezik, Geoteknik ve SEY ile izlenmesinde genel adımlar

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, deformasyon izlemesi yapılan objede beklenen en büyük deformasyonun belirlenmesinin ardından, oluşan deformasyonun nedenleri araştırılarak ölçü yöntemleri, ölçü periyodu ve donanımlara karar verilir. Obje ve

çevresini kapsayan jeodezik ağ, tasarlanıp optimizasyonu yapıldıktan sonra tesis edilir. Jeodezik ve geoteknik ölçüler periyodik olarak yapılır. Jeodezik ağ dengelenip, uyumsuz ölçüler ayıklandıktan sonra hareketin nedenini de içeren dinamik deformasyon modeli ile hareket parametreleri belirlenir. Aynı zamanda geoteknik ölçüler de analiz edilerek deformasyonlar belirlenir. SEY de obje modellendirilerek, dış yükler etkisi altında oluşan deformasyonlar belirlenir. Farklı yöntemlerle belirlenen deformasyonlar karşılaştırılarak yorum yapılır. Son adım olarak sonuçların saklanması ve sunulması yapılır. Sonuç itibarıyla, büyük mühendislik yapılarının deformasyon analizlerinde jeodezik, geoteknik ve Sonlu Eleman Yönteminin entegre edilmiş bir şekilde analiz yapılması tavsiye edilir. Bu sayede deformasyonların daha doğru bir şekilde değerlendirilmesi ve gerekli önlemlerin zamanında uygulanması mümkün olacaktır (Satır, 2007).

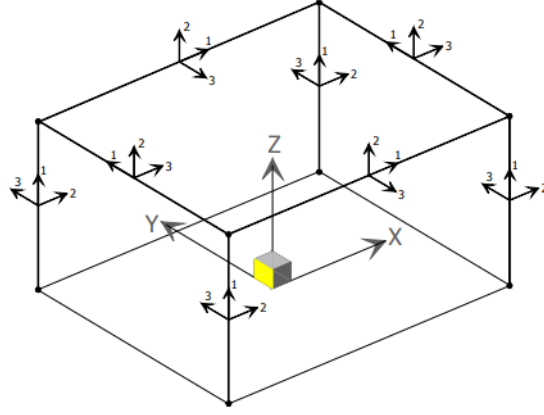
5.1. SAP2000

SAP2000 yapı sistemlerinin modellenip analizinin gerçekleştirilmesi amacı ile geliştirilen bir programdır. Grafik Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface – GUI) kullanılarak tüm işlemler ana ekran üzerinde gerçekleştirilmektedir. SAP2000 bilgisayar programı yardımı ile bir yapının analizi gerçekleştirilirken takip edilmesi gereken adımlar şunlardır:

1. Sisteme ait modelin oluşturulması
2. Kullanılan malzemelere ait bilgilerin tanımlanması
3. Yapıya ait kesit özelliklerinin tanımlanması
4. Yapıya etkiyen tekil ya da yayılı yüklerin tanımlanması
5. Sistemin çözümü için analiz işleminin yapılması (Özmen ve ark.,2018).

Koordinat Sistemleri ve Grid Çizgileri

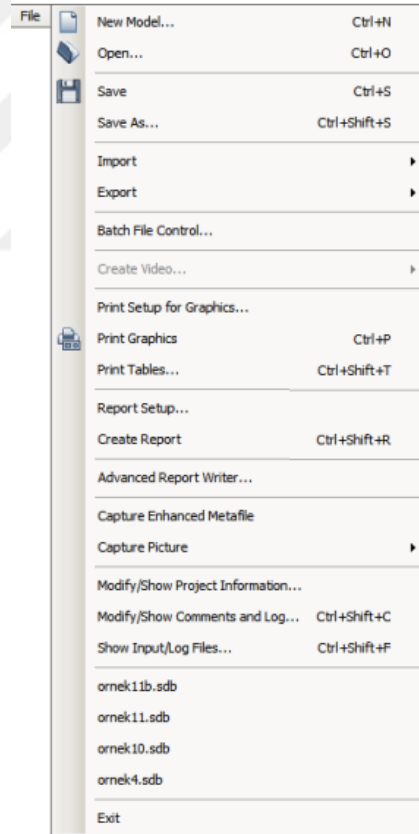
Genel koordinat sistemi kullanılarak sisteme ait model oluşturulur. Koordinat sistemi olarak Kartezyen sistem kullanılabildiği gibi Silindirik sistemde kullanılabilir. Sistem içerisindeki her bir eleman (düğüm noktası, sonlu elemanlar vb.) kendine ait yerel eksene sahiptir. Her eleman için farklı olan ve bu eksenler kesit boyutlandırmasında, yüklerin tanımlanmasında kullanılır. Şekil 5.6’ da genel sistem eksenleri ve yerel eksenler gösterilmiştir (Özmen ve ark.,2018).



Şekil 5. 6. Genel sistem eksenleri ve yerel eksenler

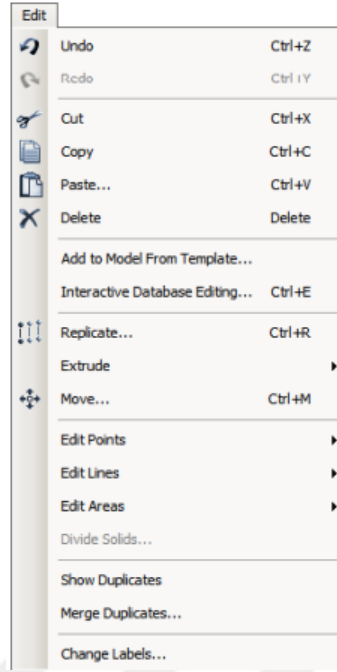
SAP2000 Menü Düzeni

File menüsü: Bu menüdeki komutlar yardımı ile yeni model oluşturma, var olan modeli açma, kaydetme, çalışmayı başka ortama aktarma ya da başka ortamlardaki çalışmayı açabilme ve çıktı alma gibi işlemler gerçekleştirilir.



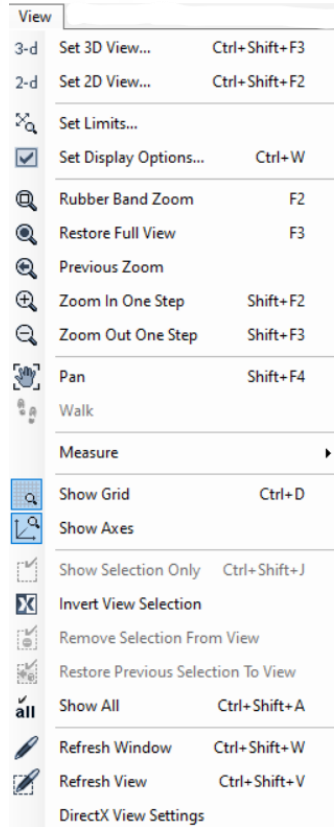
Şekil 5. 7. File menüsü alt komutlar

Edit menüsü: Bu menüdeki komutlar yardımı ile çözümü gerçekleştirilecek sisteme ait elemanların kopyalanması, çoğaltılması, kesilmesi, silinmesi, düzenlenmesi veya taşınması gibi işlemlerin gerçekleştirildiği menüdür.



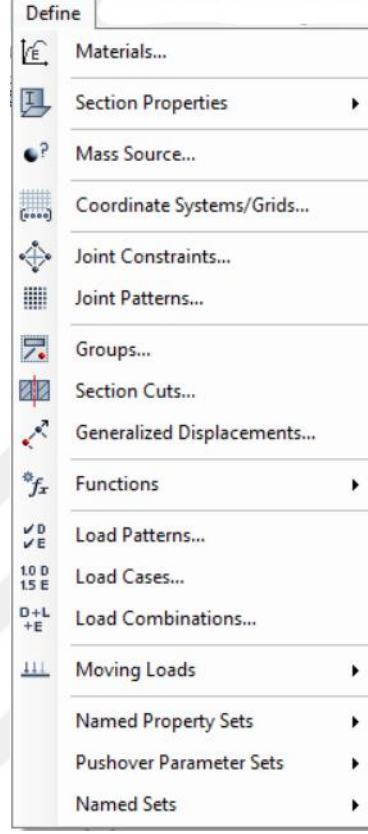
Şekil 5. 8. Edit menüsü alt komutlar

View menüsü: Bu menüdeki alt komutlar ile ekranın görünümü ile düzenlemeler gerçekleştirilir. Sistemin 2 boyuttan, 3 boyuttan görünümünü düzenlemek, görünümü büyütmek – küçültmek, yalnızca seçili olan objeleri görünür yapmak gibi işlemler için kullanılan komutlar vardır.



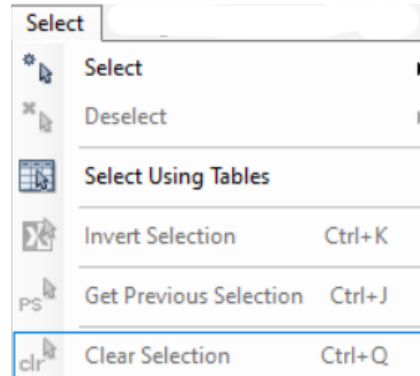
Şekil 5. 9. View menüsü alt komutlar

Define menüsü: Bu menü ile sisteme ait girdi olarak kullanılan malzeme özelliklerinin, kesit özelliklerinin, yük ve yük kombinasyonlarının tanımlanması gibi işlemleri gerçekleştirmeye yarayan alt komutları içerir.



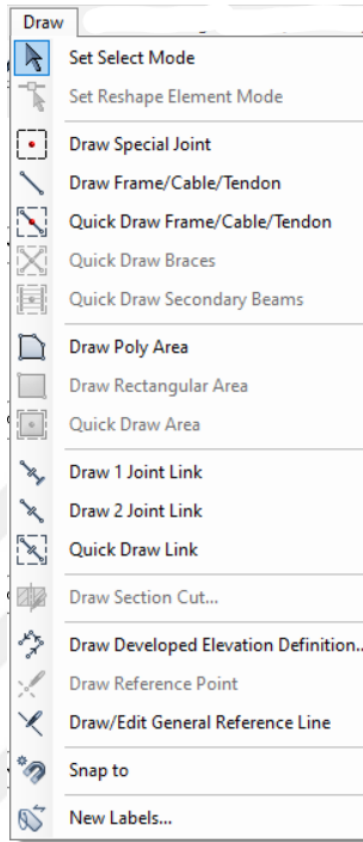
Şekil 5. 10. Define menüsü alt komutlar

Select menüsü: Bu menüdeki komutlar ile sistem için gereken seçim işlemleri, malzeme özellikleri ve kesit özellikleri gibi özelliklere bağlı seçim işlemi gerçekleştirilir.



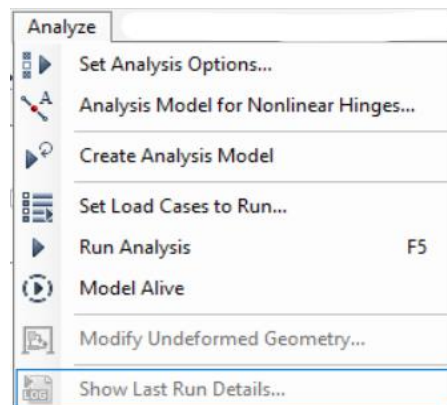
Şekil 5. 11. Select menüsü alt komutlar

Draw menüsü: Bu menüdeki komutlar ile sisteme ait elemanların çizimi ve düzenlenmesi, oluşturulan elemanların isimlendirme şekillerini belirlemek gibi işlemler gerçekleştirilir.



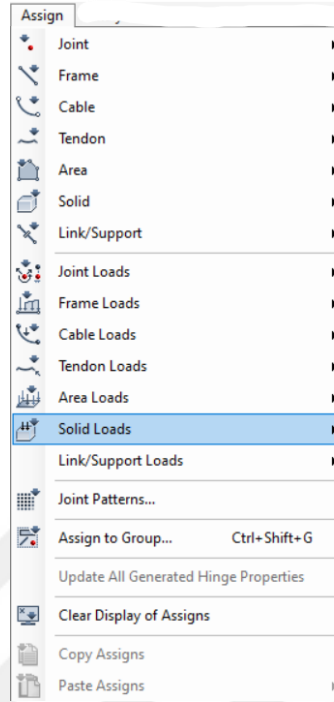
Şekil 5. 12. Draw menüsü alt komutlar

Analyze menüsü: Bu menüdeki komutlar ile sistemin analizi gerçekleştirilir.



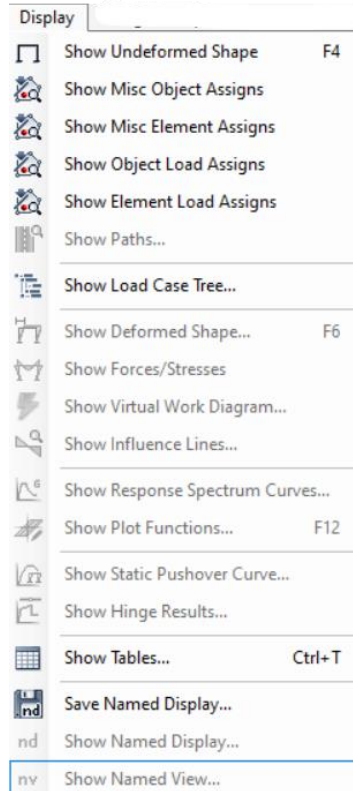
Şekil 5. 13. Analyze menüsü alt komutlar

Assign menüsü: Bu menüdeki komutlar ile sisteme ait elemanlara kesit özellikleri, yük atamaları gerçekleştirilir.



Şekil 5. 14. Assign menüsü alt komutlar

Display menüsü: Bu menüdeki komutlar ile sisteme etki edilen yük kombinasyonlarına göre şekil değiştirme durumlarını gösterir (Özmen ve ark.,2018).

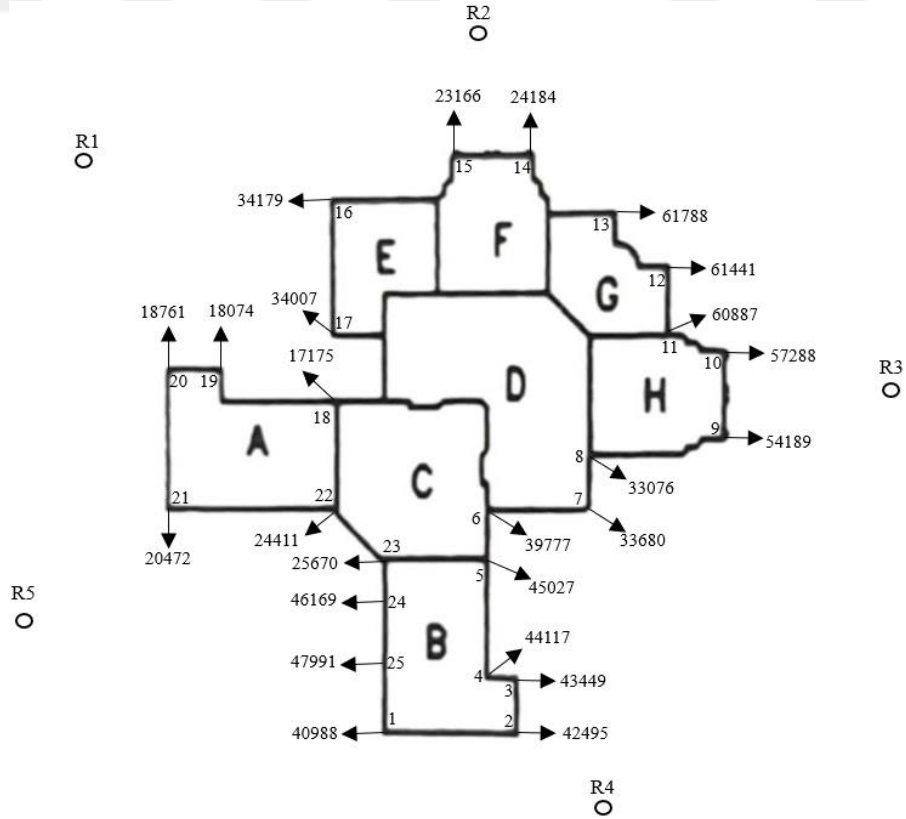


Şekil 5. 15. Display menüsü alt komutlar

6. UYGULAMA

Jeodezik yöntemlerden S transformasyonu yöntemi ve geoteknik yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi ile deformasyon analizinin karşılaştırılması amacıyla uygulama Selçuk Üniversitesi Alaeddin Keykubat kampüsünde bulunan Hukuk Fakültesi binasında gerçekleştirilen ölçülerden yararlanılmıştır. Çalışma için 4. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu kapsamında Doğanalp ve ark. tarafından gerçekleştirilmiş olan “Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesindeki Düşey Hareketlerin Jeodezik Yöntemlerle İzlenmesi ve Analizi” adlı bildirilerinde elde edilen verilerden yararlanılmıştır. Bu tezdeki amaç, jeodezik deformasyon analizi ve sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen deformasyonların birbiri ile uyumunun analiz edilmesidir.

Bu çalışma kapsamında yararlanılan bildiride S transformasyonu yöntemi ile düşey deformasyonların saptanabilmesi için bina duvarlarında olacak şekilde ve yer kotundan yaklaşık 50 cm yukarıda olacak şekilde 25 adet obje noktası tesis edilmiştir. Ayrıca hareketin beklendiği alan dışında olan 5 adet referans noktası tesis edilmiştir. Tesis edilen noktalara ait yükseklik farkları gidiş-dönüş nivelmanı ile belirlenmiştir. Şekil 6.1’ de seçilen obje noktaları ve bu noktalara karşılık gelen düğüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 6. 1. Jeodezik analiz amacı ile seçilen referans-obje noktaları ve karşılık gelen düğüm nokta numaraları

Analiz öncesinde öncelikle ağdaki periyot ölçüleri EKKY göre serbest ağ yöntemi ile dengelenmiş ve dengelemeden sonra uyuşumsuz ölçülerin ayıklanması için Pope yöntemi ile uyuşumsuz ölçü testi yapılmış ve uyuşumsuz ölçüye rastlanmamıştır. Periyot ölçülerinin ayrı ayrı dengelenmesi sonucunda yükseklik farkları ve ortalama hataları belirlenmiştir. Daha sonra S transformasyonu analiz yöntemi kullanılarak statik deformasyon analizi işlemi gerçekleştirilmiştir. S transformasyonu yöntemi ile deformasyona uğrayan noktalar tespit edilmiştir.

Analiz sonucu deformasyona uğrayan noktalar Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 1. Deformasyon analizi sonucu deformasyona uğrayan noktalar

Periyotlar	Deformasyona Uğrayan Noktalar	Periyotlar	Deformasyona Uğrayan Noktalar
Nisan 2004- Haziran 2004	27,26,28	Nisan 2004- Kasım 2004	21,22,30,7,23,26,6,20,27,25,24,1
Nisan 2004- Ekim 2004	21,22,30,27,23,20,12,7,6,8	Nisan 2004- Mart 2005	21,22,7,23,1,25,24,27,26,6,2,29,14,28,8,15

S transformasyonu ile gerçekleştirilen deformasyon analizi sonuçlarına ait yükseklik bilinmeyenleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 2. S transformasyonu analizi sonucu konumsal değişimler

N. No	Nisan 2004- Haziran 2004- Ekim 2004	Nisan 2004- Ekim 2004- Kasım 2004	Nisan 2004- Kasım 2004- Mart 2005
	Yük. Bil. (mm)	Yük. Bil. (mm)	Yük. Bil. (mm)
1	-1,6973	-2,3989	-4,5825
2	-0,4762	-0,5068	-2,0973
3	-0,0587	-0,6763	-1,4131
4	-0,1378	-0,7694	-2,0417
5	-0,2925	-1,1793	-2,0356
6	1,0227	0,5840	0,1350
7	0,8378	0,7474	0,9057
8	0,9508	0,1451	0,1359
9	0,1639	-0,6571	-0,6340
10	-0,3592	-0,9648	-0,5395
11	-0,3823	-0,7725	-0,2449
12	-0,6284	-0,4880	-0,4059
13	0,6408	0,1350	0,3785
14	0,8100	0,6580	1,7629
15	0,8822	0,6022	1,7979
16	0,7543	0,3463	1,1330
17	0,9797	0,4061	1,3365
18	0,9770	1,1942	1,7210
19	1,2078	1,0778	1,5557
20	1,0435	0,8988	1,0708
21	1,8736	1,7288	1,6863
22	-0,8485	-0,6777	0,6947
23	-0,3869	-0,6846	-0,7176
24	-2,2223	-3,1470	-4,5299
25	-2,3244	-3,4098	-4,6829

26	-0,9695	3,2390	3,7857
27	-4,7661	2,2319	4,9468
28	-0,7500	0,9893	1,7851
29	-0,0709	-1,3142	-1,7043
30	2,5300	1,3072	0,8037

S transformasyonu ile deformasyon analizi gerçekleştirildikten sonra Sonlu elemanlar yöntemi ile deformasyon analizine geçilmiştir.

6.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deformasyon Analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ile Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi binasına ait analiz gerçekleştirilmiştir. Bu yapıya ait bilgiler şöyledir;

- Katlar arası yükseklik sırasıyla bodrum kat için 4.12, zemin kat için 5.20, 1. normal kat için 3.60 ve 2. normal kat için 3.60 m’dir.
- Yapı toplamda 8 bloktan oluşmaktadır (A, B, C, D, E, F, G, H). Bu bloklardan 3’ü idare binasına (A, B, C), 3’ü eğitim binasına (D, E, G) ve 2’si amfi binasına (F, H) ayrılmıştır.
- BS20 beton sınıfı kullanılmıştır. BS20 beton sınıfına ait bilgiler şu şekildedir.

Çizelge 6. 3. Kullanılan beton sınıfına ait malzeme özellikleri

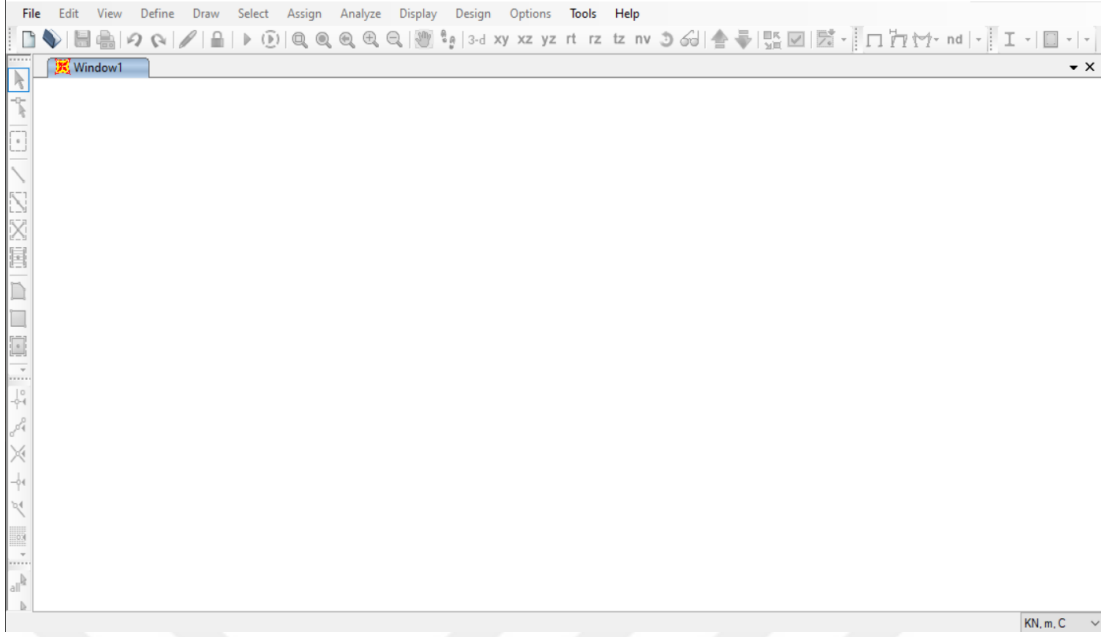
Beton Sınıfı	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	η	α (1/°C)	f_{ck} (kN/ m ²)
BS20	23.29	28000000	0.15-0,2	1×10^{-5}	25000

- ST III donatı sınıfı kullanılmıştır. ST III donatı sınıfına ait bilgiler şu şekildedir.

Çizelge 6. 4. Kullanılan donatı sınıfına ait malzeme özellikleri

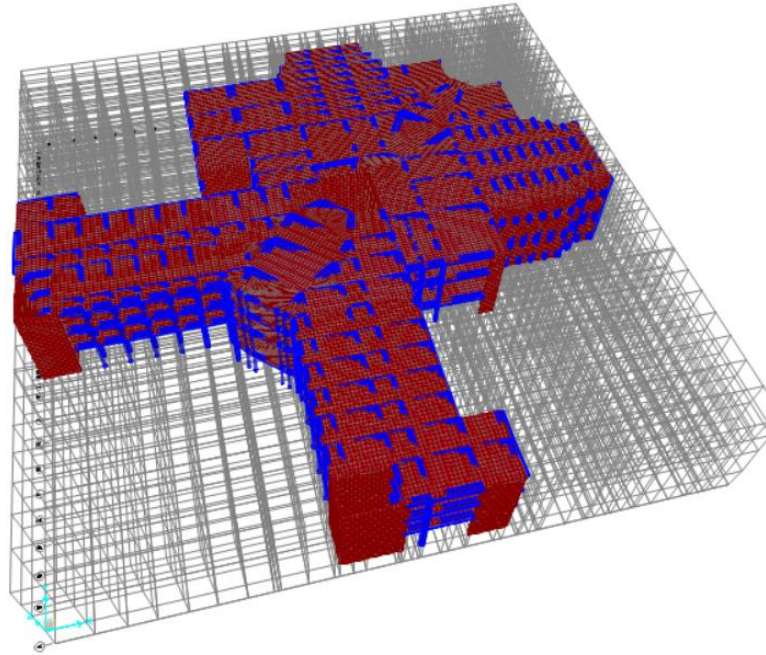
Donatı Sınıfı	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	α (1/°C)	f_y	f_u	f_{ye}	f_{ue}
ST III	76.98	20000000	1.17×10^{-5}	220000	370000	198000	333000

Yapının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken SAP2000 v20 bilgisayar programı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.



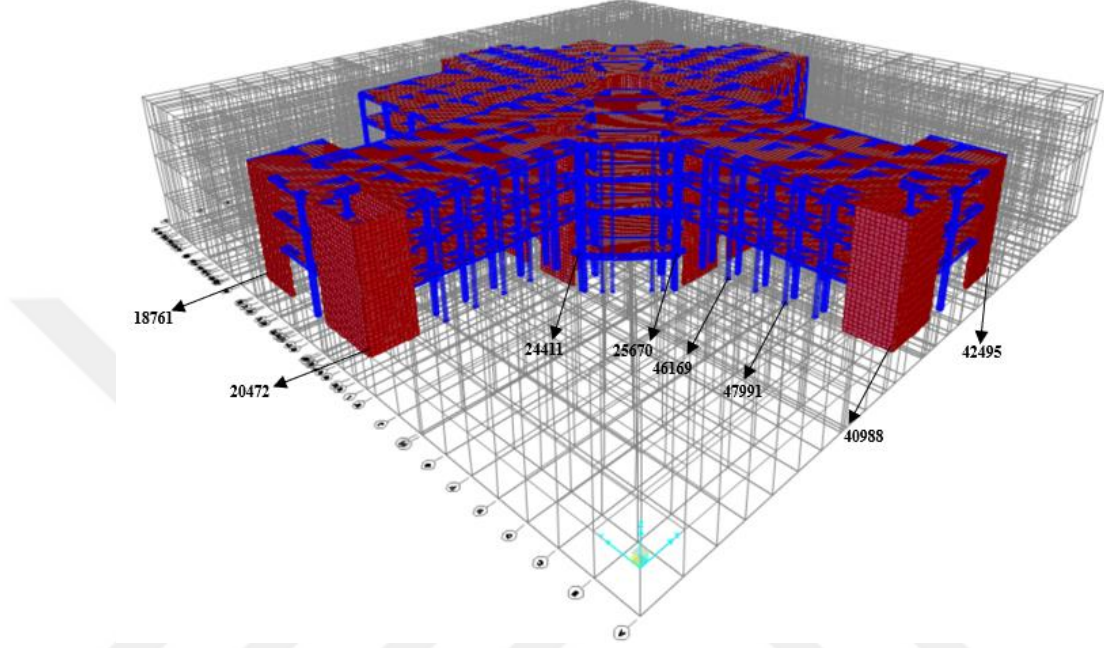
Şekil 6. 2. SAP2000 v20 programı ara yüzü

İlgili betonarme yapı SAP2000 analiz programı ile yalnızca yapının kendi ağırlığı etkisi altında çözümü gerçekleştirilmiştir. Bina deprem yönetmeliğine göre etkiyecek yük kombinasyonunda okul binasına ait sabit yükün kütle katılım kat sayısı 1, hareketli yükün kütle katılım kat sayısı 0,60 olarak alınmıştır ($G + 0,6Q$). Yapıya bu yükler dışında herhangi bir deprem yükü vs. etki edilmemiştir. Yapıya ait kolon ve kirişler çubuk eleman, perde ve döşemeler ise alan olarak tanımlanmıştır. Alanlar sonlu elemanlarına ayrılmıştır ve toplamda 65989 adet düğüm noktası elde edilmiştir. Her bir düğüm noktasında yatayda ve düşeyde olacak şekilde iki yönde yer değiştirmeleri elde edilmiştir.

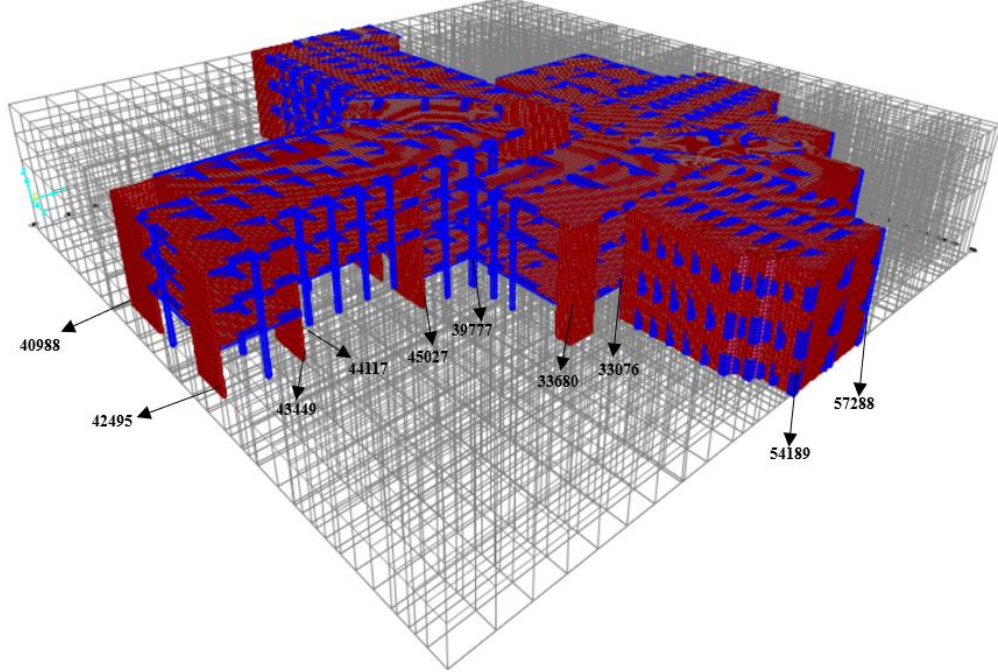


Şekil 6. 3. Yapının sonlu elemanlara ayrılmış durumu

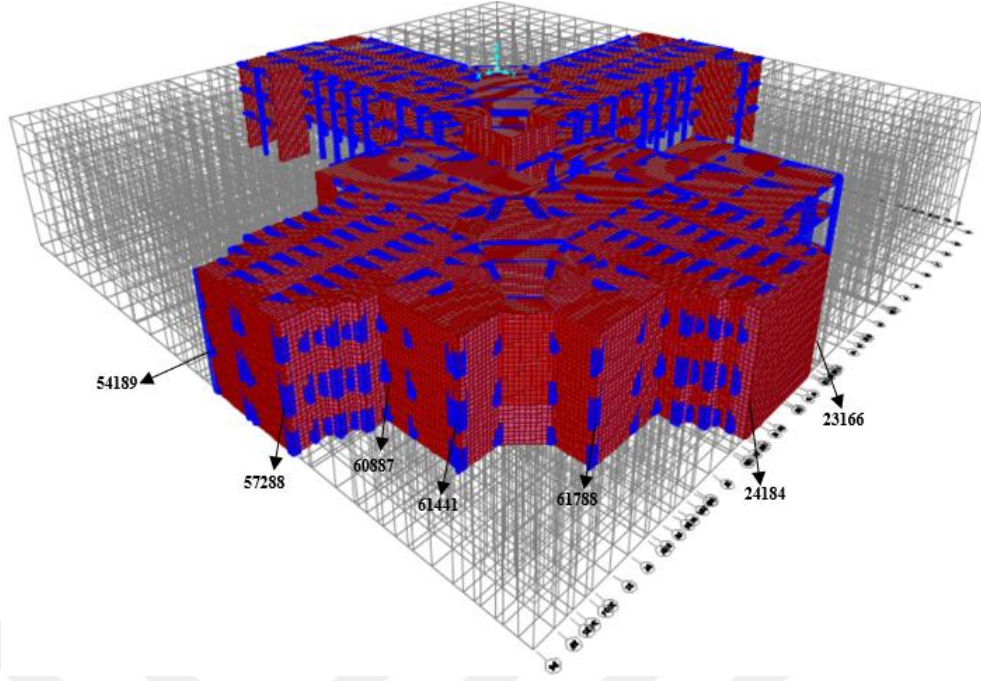
S transformasyonu yöntemi ile sadece düşeydeki hareketler araştırıldığından dolayı sonlu elemanlar yönteminde de sadece düşeyde meydana gelen yer değiştirmeler esas alınmış, yatay yer değiştirmeler dikkate alınmamıştır. Sonlu elemanlarına ayrılan yapı jeodezik ölçme için seçilen obje noktalarına en yakın olan düğüm noktası seçilerek bu noktaların hareketleri irdelenmiştir.



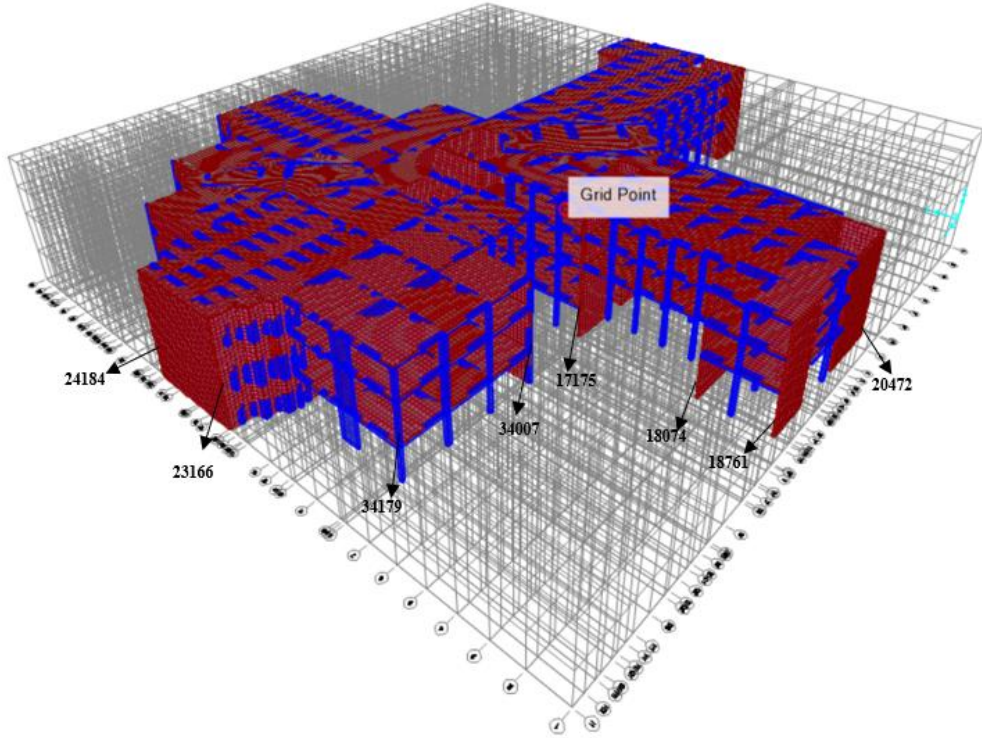
Şekil 6. 4. Seçilen düğüm noktalarının yaklaşık gösterimi (A, B ve C bloklar için)



Şekil 6. 5. Seçilen düğüm noktalarının yaklaşık gösterimi (B, C, D ve H bloklar için)



Şekil 6. 6. Seçilen düğüm noktalarının yaklaşık gösterimi (H, G ve F bloklar için)



Şekil 6. 7. Seçilen düğüm noktalarının yaklaşık gösterimi (F, E, C ve A bloklar için)

Sonlu elemanlar yöntemi ile obje noktalarında meydana gelen yer değiştirmelerin en fazla -2,598 mm, en az 0,195 mm olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6. 5. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş düşey değiştirmeler

Düğüm Noktası	Yer Değiştirme (mm)
40988 (1)	-2,598
42495 (2)	-0,899
43449 (3)	-0,311
44117 (4)	-1,020
45027 (5)	-0,932
39777 (6)	0,515
33680 (7)	0,563
33076 (8)	0,509
54189 (9)	-0,497
57288 (10)	-0,508
60887 (11)	-0,718
61441 (12)	-0,429
61788 (13)	0,195
24184 (14)	0,855
23166 (15)	0,958
34179 (16)	0,603
34007 (17)	0,825
17175 (18)	1,251
18074 (19)	-0,966
18761 (20)	-0,760
20472 (21)	1,614
24411 (22)	-0,722
25670 (23)	-0,429
46169 (24)	-1,637
47991 (25)	-1,844

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Mühendislik yapılarında meydana gelebilecek hareketlerin belirli zaman aralıkları ile izlenmesi yapı sağlığı ve can güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bu yapılarının hareketlerinin belirli sınırlar dahilinde olması, deformasyon olup olmadığının belirlenmesi ve eğer deformasyon var ise meydana gelebilecek muhtemel kazaların önceden tespit edilerek can ve mal kayıplarına neden olmadan zamanında gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak amacı ile deformasyon ölçmeleri gerçekleştirilmektedir. Deformasyon olup olmadığının belirlenebilmesi için hem jeodezik hem de geoteknik yöntemlerden uygun olan bir ölçme yöntemi ile elde edilen ölçmelerin öncelikle serbest ağ dengelemesi ile dengelenmesi gerekmektedir. Serbest ağ dengelemesi ağ yapısı ve ağın hassasiyetini tam anlamı ile yansıttığı için deformasyon analizi çalışmalarında kullanıma uygundur. Dengeleme işlemi için ölçülerin normal dağılımda olması gerekmektedir. Normal dağılımda olmayan ölçülerin belirlenmesi ve ölçü grubundan arındırılması gerekmektedir. Bu sebeple klasik ve modern olmak üzere farklı uyumsuz ölçü test metotları kullanılabilir. Uyuşumsuz ölçülerden arındırılmış ölçü grupları ile dengeleme işlemi gerçekleştirildikten sonra deformasyon analizi yapılmalıdır. Deformasyon analizi kullanım kolaylığı, ağ yapısı, ölçme planı vb. açısından bazı farklılıklara sahip olan farklı analiz yöntemlerinden biri ile yapılabilir (θ² ölçütü, bağıl güven elipsleri, S transformasyonu gibi). Jeodezik anlamda ölçü yapılması yanı sıra sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilecek olan analiz ile yapı henüz tamamlanmamış olsa bile ya da yapıyı etkileyen doğru yükler ile yapının şu andan ziyade gelecekteki uğrayacağı hareket ile ilgili de bilgi verir. SEY ile daha doğruya yakın sonuçlar elde etmek için yapının doğru bir şekilde modellenip uygun sayıda sonlu elemanlarına bölünmesi ve malzeme özelliklerinin tam anlamı ile girilmesi gerekmektedir. Ancak bu durumda her zaman ekonomik ve zamansal açıdan faydalı olmamasına sebep olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesi binasını içine alacak şekilde oluşturulan nivelman ağında yapının hareketinin dışında ancak yapıdaki ölçülerini en iyi şekilde gerçekleştirmeye yarayan 5 referans, yapı üzerinde ve yapının hareket beklentisine bağlı olarak 25 obje noktası vardır. Seçilen obje noktalarına ait yükseklik farkları gidiş-dönüş nivelman yöntemi ile elde edilmiştir ve elde edilen ölçülerden yararlanılarak statik deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Deformasyon analizinde S

transformasyonu yöntemi tercih edilmiştir. Deformasyon analizi için ölçüler ilk olarak serbest dengelenmiştir. Dengeleme sonrasında uyuşumsuz ölçülerin ayıklanması için klasik uyuşumsuz ölçü testlerinden olan Pope testinden yararlanılmış ve uyuşumsuz ölçüye rastlanmamıştır. Serbest olarak dengelenen yükseklik farkları ile S transformasyonu ile deformasyon analizi işlemi gerçekleştirilmiştir. S transformasyonu yöntemi ile gerçekleştirilen analizde her seferinden hareket ettiği belirlenen nokta eşlenik nokta grubundan çıkartılıp analiz işlemi deformasyona uğrayan nokta kalmayınca kadar tekrar edilmiştir. Gerçekleştirilen analizde sırasıyla Çizelge 6.1’ de belirtilen noktalarda deformasyon olduğu belirlenmiştir. Jeodezik deformasyon analizi sonrasında yapı SAP2000 bilgisayar programı ile sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapıya ait tüm düğüm noktaları incelenmemiş olup yalnızca obje noktalarına denk gelen düğüm noktaları irdelenmiştir. Yapıya ait malzeme özellikleri girdi olarak kullanılmıştır. Yapıya G+0,6Q yük kombinasyonu etki edilmiştir. Yapıda toplamda 65989 adet düğüm noktası oluşturulmuştur. S transformasyonu ile gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen sonuçlar ile SEY ile gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.5 birlikte incelendiğinde gerçekleştirilen analiz sonuçları belirli bir oranda benzer çıktığı sonucuna varılmıştır.

7.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen SEY ile analizde temel şartları, deprem yükü, kar yükü gibi yükler ihmal edilmiştir. Jeodezik ölçmeler ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarına daha yakın sonuçlar elde edilmesi amacı ile yapıya ait geoteknik raporların detaylı incelenip temel şartları ve yapıya etkiyen diğer yüklerde ilave edilirse daha doğru sonuçlar elde edilecektir. Ayrıca yapı teknolojik imkanlar doğrultusunda sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Daha gelişmiş bir sistem ile daha uygun sayıda ve büyüklükte sonlu elemanlarına bölünürse jeodezik ölçmeler ile daha yakın sonuçlara ulaşmak mümkün olacaktır. SEY ile yapılar bir bütün olarak incelenmesi mümkün iken jeodezik analiz yöntemleri ile yapıdaki karakteristik noktaların incelenmesi mümkündür.

Bu çalışma sonucunda görülmüştür ki deformasyon analizleri için mühendislik yapılarını en iyi şekilde yansıtmaya özen gösterilen obje noktaları kullanılarak gerçekleştirilen jeodezik ölçmeler ile analizi kapsayan harita mühendisliği alanı ile yapıyı bir bütün olarak inceleyen SEY analizleri ile ilgilenen inşaat mühendisleri, makine mühendisleri gibi daha birçok farklı meslek disiplini ortak alanda buluşup bir arada

alışarak elde ettikleri bulguları bir arada irdeleyerek yapıya ait sistem kolaylıkla özöllebilecek ve daha doğru sonuçların elde edilmesi mümkün hale gelecektir. Böylece mühendislik yapılarını insan yaşamı açısından daha güvenli hale getirmek ve gereken önlemlerin zamanında alınmasını sağlamak daha olanaklı olacaktır.



8. KAYNAKLAR

- Acosta L. E., Lacy M. C., Ramos M. I., Cano J. P., Herrera A. M., Avilés M., Gil A. J., 2018, Displacements Study of an Earth Fill Dam Based on High Precision Geodetic Monitoring and Numerical Modeling, *Sensors*, 18, 1369.
- Alçay S., 2014, Beton Kemer Barajlardaki Deformasyonların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi ve Ermenek Barajı Örneği, *Doktora Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Alkan R. M., Güral V. E., İlçi V., Ozulu İ. M., Alkan M. N., Köse Z., Aladoğan K., Tombuş F. E., Şahin M., Yavaşoğlu H., Oku G., 2016, Obruk Barajı Deformasyon Ölçmeleri, *HKMO-Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri SEYpozyumu, Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul.
- Atasoy V., Öztürk E., 2005, Jeodezik Deformasyon Ölçmeleri ve Sonuçların Yorumu, *Harita ve Kadastro Mühendisliği*, sayı: 50-51, sayfa:27-40, TMMOB-HKMO Yayını, Ankara.
- Aydın H. İ., 2021, Ön Yüzü Beton Kaplı Sakarya Akçay Barajı'nın Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Tasarımı ve Arazide Yapılan Ölçümlerle Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Balı H., 2021, Barajlardaki Deformasyonların Geoteknik Cihazlar İle İzlenmesi, Deriner Barajı Örneği, *Yüksek Lisans Tezi, N.E.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Bayraktar A., 1991, Beton Ağırlık Barajlarda Baraj- Su- Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi, *Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Benli A., 1996, Kemer Barajların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Bilgen B., 2022, GNSS Ölçüleri ile Deformasyon Analizi Amaçlı Yazılım Geliştirme, *Doktora Tezi, KTÜN Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Bülbül S., 2013, Yatay Yöndeki Deformasyonların Belirlenmesinde Bağlı Güven Elipsleri ve Cholesky Çarpanlarına Ayırma Yönteminin Kullanılabilirliği, *Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Carbonell J. M., Monforte L., Ciantia M. O., Arroyo M., Gens A., 2022, Geotechnical Particle Finite Element Method for Modeling of Soil-Structure Interaction Under Large Deformation Conditions, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14 967-983.
- Chai S., Xiao R., Wang X., 2016, Approximate Calculation for Deformation of Multi-Tower Suspension Bridges, *Structural Engineering International*, 45-51

- Çarhoğlu A. I., 2011, Türkiye’deki Mevcut Kemer Barajların Deprem Etkisindeki Davranışlarının Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi, *Doktora Tezi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.
- Demirci K. C., 2023, Güven Elipsoitleri ile Deformasyon Analizi, *Yüksek Lisans Tezi, KTÜN Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Demirel H., 2009, Dengeleme Hesabı, *Y.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Üniversite Yayın No: YTÜ.İN.DK-05.0735, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul*, Sayfa: 167-176.
- Demirkaya S., 2005, Bir Kemer Barajdaki Yatay Konum Değişimlerinin Fiziksel Yorumu, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Ding X., He X., Yang G., Chen Y., 2004, Application and evaluation of a GPS multi-antenna system for dam deformation monitoring, *Earth Planets Space*, 56, 1035–1039.
- Doctors L. J., 1970, An Application of the Finite Element Technique to Boundary Value Problems of Potential Flow, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, 243-252.
- Doğanalp S., 2005, “Kinematik Modelde Kalman Filtreleme Yöntemi ile Deformasyon Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya
- Doğanalp S., Yiğit C.Ö., İnal C., Turgut B., Ceylan A., Şanlıoğlu İ., 2009, “Selçuk Üniversitesi Hukuk Fakültesindeki Düşey Hareketlerin Jeodezik Yöntemlerle İzlenmesi ve Analizi”, *4. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri SEYpozyumu*, Trabzon.
- Ehiorobo J. O., Ehigiator R. I., 2011, Monitoring for Horizontal Movement in an Earth Dam Using Differential GPS, *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)* 2 (6), 914-920.
- Erkaya H., Hoşbaş R. G., Güllal V. E., Ersoy N., Doğan U., Pırtı A., Soycan M., Gümüş K., Öcalan T., Aykut N. O., Akpınar B., Poyraz F., 2009, Beton Kemer Barajlarda Deformasyonların Modern Ölçme Teknikleri ile Belirlenmesi, *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Erol S., 2008, GPS ve Nivelman Ölçüleriyle Deformasyonların Belirlenmesi, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ghafari A., Nikraz H. R., Sanaeirad A., 2016, Finite Element Analysis of Deformation and Arching Inside the Core of Embankment Dams During Construction, *Australian Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 1, 13–22.
- Gikas V., Sakellariou M., 2008, Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring, *Engineering Structures* 30, 3074–3081.

- Güler G., Kılıç H., Hoşbaş G., Özaydın K., 2006, Evaluation of the Movements of the Dam Embankments by Means of Geodetic and Geotechnical Methods, *Journal of Surveying Engineering ASCE*, Vol: 132 / No: 1, 31-39.
- Heunecke O., Welsch, W., 2001, Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys, *Journal of Geospatial Engineering*, Vol 2. No1, pp35-44, Hong Kong.
- İbaoğlu R., 2019, Düşey Yöndeki Deformasyonların Kinematik Modelle Belirlenmesi: Ermenek Barajı Örneği, *Yüksek Lisans Tezi, KTÜN Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- İnal C., 2021, Dengelemede Özel Konular Ders Notları (basılmamış), *Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi*, Konya.
- İnal C., 2022, Mühendislik Ölçmeleri Ders Notları (basılmamış), *Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi*, Konya.
- İnal C., 2022, Deformasyon Ölçülerin Analizi Ders Notları (basılmamış)”, *Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi*, Konya.
- Kalkan Y., Alkan R. M., 2005, Mühendislik Yapılarında Deformasyon Ölçmeleri, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri SEYpozyumu*, 64-74, İstanbul.
- Kalkan Y., 2014, Baraj Emniyeti ve Deformasyon İzleme Çalışmaları Atatürk Barajı Örneği, *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt: 6, No: 3, (40-50).
- Keskin M. E., Korkmaz K. A., Çarhoğlu A.I., Helvacı D., 2009, Dim Barajının Deprem Güvenliğinin Dinamik Analizlerle İncelenmesi, *TÜBAV Bilim Dergisi* 2(2), 128-137.
- Konakoğlu B., 2019, Beton Barajlarda Deformasyonların Statik, Kinematik ve Dinamik Modeller ile Belirlenmesi: Artvin Deriner Barajı Örneği, *Doktora Tezi, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Kulkarni M. N., Sakr K., Radhakrishnan N., 2006, Study of the Deformation of Koyna Region using Global Positioning System, *Structural Analysis of Historical Constructions*, 1901-1906, New Delhi.
- Kulkarni R., Santhi M. H., 2015, Non-Linear Time History Analysis of Concrete Gravity Dam by Using SAP2000, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 4, 2038-2044.
- Olyazadeh R., Setan H., Fouladinejad N., 2011, Network Adjustment Program using MATLAB, *Geospatialworldforum*, Hyderabad, India
- Özkuzukıran S., Özkan M. Y., Özyağcıoğlu M., Yıldız G.S., 2006, Settlement behaviour of a concrete faced rock-fill dam, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24: 1665–1678.

- Özmen G., Orakdöğen E., Darılmaz K., 2018, Örneklerle SAP2000-V20, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Satır B., 2007, Tünel Deformasyonlarının Jeodezik, Geoteknik ve Sonlu Elemanlar Yöntemleri ile Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Şenel M., 1996, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Yapı Analizi Yapan Bir Bilgisayar Programı, *Yüksek Lisans Tezi, P.Ü. Fen Bilimleri Üniversitesi*, Denizli.
- Taşçı L., Yıldırım B., Gökalp E., 2004, Kaya Dolgu Barajda Deformasyonların Jeodezik ve Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi, *F. Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 205-219.
- Taşçı L., 2008, Dam Deformation Measurements With GPS, *Geodesy and Cartography*, 34(4): 116–121.
- Tekin E., Ünsal N., Arslan G., 2019, Topçam Tüneli Deformasyonlarının Rastgele Küme Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 115-127.
- Uysal A., 2012, Alibey Barajı'nda Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ünsal N., Tekin E., Arslan G., 2019, Köprübaşı Barajının Oturma Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Hesaplanması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 101-114.
- Wang T., Perissin D., Rocca F., Liao M., 2011, Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis, *Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Vol.54 No.5: 720–732.
- Wu S., Cao W., Zheng J., 2016, Analysis of working behavior of Jinping-I Arch Dam during initial impoundment, *Water Science and Engineering*, 9(3): 240-248.
- Yiğit C. Ö., 2010, Yüksek Yapıların Farklı Sensörler İle Tam Ölçekli İzlenmesi ve Dinamik Parametrelerin Belirlenmesi, *Doktora Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Yiğit C. Ö., Alçay S., Ceylan A., 2015, Displacement response of a concrete arch dam to seasonal temperature fluctuations and reservoir level rise during the first filling period: evidence from geodetic data, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 7, No. 4, 1489-1505.
- Yetkin M., 2012, GNSS Gözlemlerinin Robust Kestirim ve Robustluk Analizi Yöntemleriyle Değerlendirilmesi Üzerine Bir İnceleme, *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul
- Zvanut P., 2022, 3D Finite Element Analysis of a Concrete Dam Behavior under Changing Hydrostatic Load: A Case Study, *Materials*, 15, 921.

Zhang W., Liao J., Chen Y., 2024, Assessment of maximum and minimum hanger forces in a triple-cable suspension bridge under live load: Analytical algorithm with manta ray foraging optimization, *Elsevier Structures*, 64, 106517.



