

**BOLVADİN/AFYONKARAHİSAR KENT MERKEZİNDE MEYDANA GELEN
DÜŞEY DEFORMASYON HIZLARININ BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kaan ÇALIŞKAN

Danışman

Prof. Dr. Tamer BAYBURA

İkinci Danışman

Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

Bu tez çalışması 115Y246 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BOLVADİN/AFYONKARAHİSAR KENT MERKEZİNDE
MEYDANA GELEN DÜŞEY DEFORMASYON HIZLARININ
BELİRLENMESİ**

Kaan ÇALIŞKAN

Danışman

Prof. Dr. Tamer BAYBURA

İkinci Danışman

Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOLVADİN/AFYONKARAHİSAR KENT MERKEZİNDE MEYDANA GELEN DÜŞEY DEFORMASYON HIZLARININ BELİRLENMESİ

Kaan ÇALIŞKAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tamer BAYBURA

İkinci Danışman: Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU

Bu araştırmada, Bolvadin ilçe merkezinde meydana gelen asismik yüzey deformasyonlarının hassas nivelman tekniği ile incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla bölgeye 8 profil 81 noktadan oluşan nivelman ağı kurulmuştur. 115Y246 nolu TÜBİTAK kapsamında 3 kampanya nivelman ölçüsü yapılmıştır. 2019 ve 2020 yıllarında, bu çalışma kapsamında yapılan nivelman ölçüleri ile 5 kampanya ölçü değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucu toplam 360 mm'ye yakın deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu deformasyonun nedeninin yeraltı su seviyelerindeki düşüşle beraber tektonik kökenli olabileceği düşünülmektedir. Kampanya ölçümleri sonucunda yapılan değerlendirme ile deformasyon hızının 2016 yılından 2020 yılına kadar arttığı ve sürekli devam ettiği, 2019-2020 dengelenmiş yükseklik farkları incelendiğinde geçmiş yıllardaki deformasyon hızının 2 katına çıktığı görülmüştür.

2021, x + 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Deformasyon, Hassas Nivelman, Bolvadin Fayı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE DETERMINATION OF VERTICAL DEFORMATION VELOCITIES IN THE CITY CENTER OF BOLVADİN/AFYONKARAHİSAR

Kaan ÇALIŞKAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatics Engineer

Supervisor: Prof. Tamer BAYBURA

Co-Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim TİRYAKİOĞLU

In this study, the aseismic surface deformations occurring in Bolvadin district center are investigated with precise leveling technique. For this purpose, a leveling network consisting of 8 profiles and 81 points was established in the region. Within the scope of TUBITAK Project numbered 115Y246, 3 campaign of leveling measurements were collected in the study area. In 2019 and 2020, two more measurements campaigns performed within the scope of this study. Therefore, 5 campaigns of measurements were evaluated to investigate the surface deformations. As a result of the evaluations, the deformations up to 360 mm in total were calculated. It is assumed that the reason for this deformation could be of tectonic origin with the decrease in groundwater levels. When the results of the campaign measurements are examined, the rate of deformation increased from 2016 to 2020 and continues to increase steadily. When the 2019-2020 adjusted height differences are examined, it is seen that the deformation rate in the previous years has been doubled.

2021, x + 81 pages

Keywords: Deformation, Precision Leveling, Bolvadin Fault

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Tamer BAYBURA teşekkür ederim.

Lisans eğitimimden bugüne denk yanımda olan, her türlü bilgi birikimi aktaran, çalışma disiplini, iş azmini, akademik kariyerini örnek aldığım ve rol model olarak gördüğüm, tez çalışmamda; gerek arazi ölçümleri, gerekse yazım aşamasında vermiş olduğu desteklerden dolayı Sayın Doç. Dr. İbrahim TİRYAKİOĞLU' na teşekkür ederim.

Her zaman için beni koşulsuz şartsız destekleyen, aldığım kararlara saygı duyan ve beni emekleriyle bu günlere getiren babam Kaya ÇALIŞKAN'a, annem Nevin ÇALIŞKAN'a, ablam Berna ÇALIŞKAN'a ve değerli aile büyüğüm Aslıhan ERDEM AKINCI' ya teşekkür ederim.

Birbirimizin her zaman yanında olduğumuz gibi tez çalışmamı hazırlarken de her aşamada yanımda olan, bu süreçte varlıklarıyla beni mutlu eden çocukluk arkadaşlarım, dostlarım Av. Umut Şeref ALBAYRAK' a, Havva Nur GENCER' e, Ozan KARACA' ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamda bilgi birikimini ve manevi desteklerini bir an olsun bile esirgemeyen meslektaşım, abim Harita Yük. Müh. Mehmet ÖZTÜRK, Harita Müh. Erdi YENİCE ve Harita Yük. Müh. Sercan KELEK' e teşekkür ederim. Arazi çalışmalarının yürütülmesi sırasında destek veren meslektaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Kaan ÇALIŞKAN
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
3. MATERYAL ve METOT	5
3.1 Deformasyon ve Deformasyon Modelleri	5
3.1.1 Deformasyon Oluşumunun Belirlenmesi ve Elde Edilmesi.....	5
3.1.2 Deformasyonların Sınıflandırılması.....	6
3.1.3 Deformasyon Ölçümleri Niçin Yapılmalıdır	8
3.1.4 Deformasyon Ölçümlerinin Uygulama Alanları.....	8
3.2 Deformasyon Modelleri.....	11
3.2.1 Statik Model	12
3.2.2 Dinamik Model	12
3.2.3 Kinematik Model	12
3.2.4 Genelleştirilmiş Deformasyon Modeli.....	13
3.3 Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçmeleri.....	14
3.3.1 Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi.....	14
3.3.2 Hassas Geometrik Nivelman Ölçümünde Kullanılan Alet ve Donanımlar .	15
3.3.3 Hassas Geometrik Nivelman Ölçümünde Kullanılan Yöntemler	16
3.4 Jeodezik Ağlarının Dengelenmesi	19
3.4.1 Gauss-Markoff Modeli.....	19
3.4.2 Serbest Ağ Dengelemesi	21
3.4.2.1 Tüm İz Minimum Çözümü.....	26
3.4.2.2 Kısmi İz Minimum Çözümü	27
3.4.2.3 Klasik Dengeleme	28
3.4.2.4 S – Dönüşümü	29
3.4.3 Nivelman Ağlarında Uyuşumsuz Ölçü Testi	30

3.4.3.1 Data – Snooping Yöntemi	32
3.4.3.2 Tau-Testi	33
3.4.3.3 t-Testi.....	34
3.4.3.4 Robust (Sağlam) Kestirim Yöntemi	35
3.4.3.5 Test Yöntemlerinin Karşılaştırması.....	39
3.4.4 Nivelman Ağlarında Duyarlılık ve Güven Ölçütleri	40
3.4.4.1 Nivelman Ağlarında Duyarlılık Ölçütleri.....	40
4.UYGULAMA.....	43
4.1 Jeodezik Ağın Kurulması.....	44
4.2 Nivelman Ölçümleri	46
4.3 Hassas Nivelman Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	51
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	74
6. KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AAG	Afyon-Akşehir Grabeni
ASFS	Akşehir Simav Fay Sistemi
DSİ	Devlet Su İşleri Müdürlüğü
EKK	En Küçük Kareler
GNSS	Global Navigation Satellite Syste
GPS	Global Positioning Systems
G	Geri Okuma
İ	İleri Okuma
LTT	Levha Tektoniği Teorisi



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Deformasyon oluşumunun elde edilmesindeki adımlar (Gülal 2003).	6
Şekil 3.2 Deformasyonların sınıflandırılması (Gülal 2003).	7
Şekil 3.3 Kule şeklindeki bir objedeki deplasmanlar ve şekil değişimleri (Gülal 2003). 8	
Şekil 3.4 İnvar mira ve mira altlığı (Doğan 2019).	16
Şekil 3.5 Mira eğiklik hatası (Ceylan 1993).	18
Şekil 3.6 Robust kestirim fonksiyonları (Ünver 1994)	38
Şekil 4.1 Afyon-Akşehir Grabeni ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Özkaymak vd. 2017, Emre vd. 2011 ve Turan, 2002'den düzenlenmiştir).	44
Şekil 4.2 Bolvadin'deki jeodezik ağ ve ana ağ noktaları.	45
Şekil 4.3 A ile gösterilen resimde tesis edilen RS aparatları, B ile gösterilen resimde RS noktalarının tesis edildiği elektrik direkleri.	46
Şekil 4.4 Nivelman güzergâhlarının Google earth uydu görüntüsü üzerindeki lokasyonları; kırmızı hatlar yüzey deformasyonlarını, yeşil hatlar nivelman güzergâhlarını, sarı ve mavi hatlar bağlantı nivelmanını göstermektedir (Bozkuş 2019).	48
Şekil 4.5 Arazi ölçümleri (2020).	49
Şekil 4.6 Örnek nivelman klişesi.	49
Şekil 4.7 2016-2017 deformasyon haritası, harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.	53
Şekil 4.8 Güzergâhların 2016-2017 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.	54
Şekil 4.8 2017-2018 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.	55
Şekil 4.9 Güzergâhların 2017-2018 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.	56

Şekil 4.10 2018-2019 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.	57
Şekil 4.11 Güzergâhların 2018-2019 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.....	58
Şekil 4.12 2019-2020 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.	59
Şekil 4.13 Güzergâhların 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.....	60
Şekil 4.14 2016-2020 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.	61
Şekil 4.15 Güzergâhların 2016-2020 yılları arasındaki deformasyon kesitler.....	62
Şekil 4.16 Güzergâhların 2016-2020 yılları arasındaki deformasyon miktarına göre 3 boyutlu haritası, harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağın noktalarıdır.....	63
Şekil 4.17 1 ve 2'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.....	64
Şekil 4.18 3 ve 7'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.....	65
Şekil 4.19 4 ve 5'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.....	66
Şekil 4.20 6 ve 9'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.....	67
Şekil 4.21 A ile gösteren gösterilen fotoğraf 2016-2020 deformasyon miktarının 3 boyutlu gösterimi, B ile gösterilen fotoğraf 9'nolu güzergâhtaki bir yapının 2015 yılına ait fotoğrafı, C ile gösterilen fotoğraf 9'nolu güzergâhtaki bir yapının 2020 yılına ait görüntüsü (C ile gösterilen fotoğrafta kırmızı çizgi yüzey deformasyonunu temsil etmektedir.).....	68
Şekil 4.22 1 ve 2'nol güzergâhların deformasyon grafiği (Sigma büyüklükleri gerçek değerinin 10 katıdır).	69
Şekil 4.23 3 ve 7'nolu güzergâhların deformasyon grafiği (Sigma büyüklükleri gerçek değerinin 10 katıdır).	70

Şekil 4.24 4 ve 5'nolu güzergâhların deformasyon grafiği.	71
Şekil 4.25 6 ve 9'nolu güzergâhların deformasyon grafiği.	72
Şekil 4.26 Ortalama deformasyon hız haritası (kırmızı çizgiler yüzey deformasyonlarını, oklar deformasyon değişim yönünü göstermektedir.).	73



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Deformasyon değerlendirme modelleri (Gülal 2003).....	11
Çizelge 3.2 Jeodezik ağlarda datum parametreleri (Gülal 1992)	22
Çizelge 4.1 Profillerdeki noktalar ve numaraları.	45
Çizelge 4.2 Kampanya ölçümlerinin tarihlerini ve kimin tarafından yapıldığını gösteren çizelge.	47
Çizelge 4.2 Güzergâh hata sınırları çizelgesi	51
Çizelge 4.3 Serbest ağ dengelemesi sonucu kampanyalara göre Karesel ortalama hataları	52

1. GİRİŞ

İnsanoğlu insanlığın başlangıcından beri afetlerin ve büyük felaketlerin nedenlerini, bulmak ve bunlara karşı tedbir almak istemiştir. Bu merakın ve insanoğlunun şu an ki teknolojisine rağmen; depremler önemini ve gizemini hala korumaktadır.

Depremler kısaca yer kabuğunda biriken enerjinin bir kırılmayla aniden ortaya çıkması neticesinde sismik dalgalanmalar ve oluşan dalgaların yeryüzünü sarması olarak tanımlanmaktadır. Bu sarsıntıların ne zaman olacağını saptamak bilimi hala meşgul ederken, sarsıntıların nedenlerini ortaya koyarak açıklamaktadır.

Depremlerin oluşmasını sağlayan mekanizma 1915 yılında bilim adamı Alfred Lothar Wegener tarafından ortaya konulan Levha Tektoniği Teorisi (LTT) ile açıklanır. Wegener tarafından ortaya atılan bu levha tektoniği kuramı; Pangaea adı verilen tek bir kıtanın farklı kuvvetlerin etkisinde kalarak bölünmesiyle diğer kıtaların ortaya çıkmasını savunmaktadır. Wegener bu düşünceye dünya haritasında oluşan kıtalara bakarak bir yapboz parçası gibi olduklarını düşünerek varmıştır. Levha Tektoniği Teorisi'ne göre yeryüzünün manto ve kabuk kısmını meydana getiren Litosfer parçalı ve kırıklı bir özelliğe sahiptir. Bu parçaların her birine Levha, Levhaların sınırlarını oluşturan kırıklara ise fay denir. Levhalar her zaman birbirleriyle milimetreyle ifade edilebilecek küçük çaplı hızlarda, hareket halindedir ve bu hareketlerin sonucunda faylarda depremler oluşmaktadır (Dönmez ve Tiryakioğlu 2018).

Bazı faylar doğrultuları boyunca yıkıcı deprem olmaksızın da kayma hareketi yapar. Bu yavaş ve asismik kayma hareketi “Fay kripti” veya “krip” olarak belirtilir. Krip hareketi, sabit ve devamlı ya da süreksiz ve bölgesel olup, krip hareketi görülmüş fay segmentlerindeki uzun süreli hızı depremlerden önce veya sonra değişkenlik gösterebilir. Krip hareketi fay zonlarında iki yöntemde görülmektedir. Bunlardan birincisi, krip hızının fayı meydana getiren levhaların ortalama hızına eşit olması hususunda enerji birikiminin olmayacağı ve kripli segmentlerde büyük deprem meydana gelebileceğini engelleyeceği şeklindedir. İkincisi ise, krip hareketinin sığ bir derinlikte meydana geldiği ve levhaların hızından daha yavaş bir kayma hızına sahip olduğudur. Bu hususta enerji birikimini

engellenemez. Nedeniyle fay orta ve büyük depremlere sebep olabilir. Bu bakımdan, Sylvester (1986)'a göre krip, depremlerin habercisidir. Bu nedenlerden dolayı, doğrultu ve derinlik boyunca fay kripinin hız ve büyüklüğü, sismik risklerin yorumlanmasında ve deprem döngüsü ile fay davranış biçimini anlayabilmemiz için anahtar parametrelerdir. Bu yüzden faylar devamlı olarak izlenmesi ve saptanması gerekir.

Bu çalışma sınırlarında, Afyon-Akşehir Grabeni'nin orta bölümünde yer alan Bolvadin yerleşim alanı içerisinde, son yıllarda, Bolvadin Fayına paralel/yarı paralel gidişli daha önceden olmayan yüzey deformasyonları oluşmuş ve oluşmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Yerleşim alanlarından geçen yüzey deformasyonları üzerinde bazı binalarda çatlamlar, yeraltı su ve kanalizasyon kanallarında kırılmalar meydana gelmiştir. Çizgisel gidişli yarı ve çatlaklar şeklinde gözlenen yüzey deformasyonları boyunca güneydoğuda kalan bloğun düştüğü gözlemlenmiştir. Daha önce kurulan ve bu bölge içinde kalan bir Global Navigation Satellite System (GNSS) noktası incelendiğinde stabil kalan alanlara göre bölge içinde kalan istasyon noktasında yaklaşık 20 cm'lik düşey hareket gözlemlenmiştir (Bozkuş 2019).

Bu kapsamda bölgede yapılan hassas nivelman çalışmaları Yalçın (2019), Bozkuş (2019) düşey yönde bir kribin olduğu gözlemlenmiştir. Özkaymak vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada; yerleşim alanı içindeki haritalanan yüzey deformasyonlarının en kuzey de olan Bolvadin Fayı'nın güneybatıdaki devamı niteliğinde ve tektonik katkısını araştırmak için bölgede hendek tabanlı paleosismolojik çalışmalara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Özkaymak vd. (2019) yapmış oldukları paleosismolojik çalışmalar sonucunda Bolvadin Fayı'nın yaklaşık 2 km genişliğinde ve 16 km uzunluğunda eğim atımlı normal bir fay olduğunu ve 2002 Çay depremlerinden (Mw: 6.3 ve 6.0) sonra gelişen asismik yüzey deformasyonlarının (postsismik gevşeme) daha eski yüzey kırılmasını takip ettiğini gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında Bolvadin civarında meydana gelen yüzey deformasyonları 5 kampanya hassas nivelman ölçüsü (2016-2017-2018-2019-2020) elde edilmiştir. Bu ölçüler doğrultusunda oluşan deformasyonların hızları incelenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Akşehir Simav Fay Sistemi (ASFS) Kuzeybatı-Güneydoğu (KB-GD) uzanımlı olan çok miktarda devamsız aktif normal fay zonlarının meydana getirdiği ve Batı Anadolu genişleme bölgesi içersin de kalan önemli sismolojik kuşaklardan birisidir. Aletsel ve tarihsel dönemde meydana gelen birçok depremin kayıtları incelendiğinde bu sistem içinde kalmış yüzey kırığı oluşturmuş olan depremlerin olduğunu işaret etmektedir (Tiryakioğlu vd. 2017, Özkaymak vd. 2019).

Akşehir Simav fay sisteminin orta kesimini oluşturan ve fay sisteminin kapsamlı gidişine paralel olarak uzanan dört ana graben, yedi adet horst ve bu yapıların genel gidişine yaklaşık dik açıda gelişmiş üç adet ikincil graben ile bu graben horst sisteminin kenar faylarıyla şekillenip karakterize edilir. Yaklaşık Batı-Kuzeybatı(BKB)-gidişli ana grabenler ve horstlar güneydoğudan kuzeybatıya doğru Akşehir Afyon, Sinan-paşa, Altıntaş ve Ağaç köy grabenleri; Kızıldağ, Paşa dağ, Çavdarlı, Olucak, Ahır Dağ ve Murat Dağı horstları olarak dizilir. İkincil grabenler ise yaklaşık Kuzey-Kuzeydoğu (KKD)-gidişli Karamık, Şuhut ve Banaz grabenleridir. Tüm bu graben ve horstların kenarlarını sınırlayıp kontrol eden ve büyüklüğü 5 ve daha büyük deprem üretme potansiyeline sahip olan faylardır (Bozkuş 2019).

3 Şubat 2002 yılında meydana gelen depremler ile aktif çöküntü alanı olduğu ispatlanan Eber gölünün bulunduğu graben tabanını kuzeyden sınırlayan kenar faylarından birisi olan Bolvadin fayı, yaklaşık 16 km uzunluğunda güneydoğuya eğimli, Kuzeydoğu-Güneybatı (KD-GB) uzanımlı aktif bir faydır. Kuzeydoğusu uzanımca morfolojik olarak belirgin çizgisellik sunan fay, güneybatısında alüvyon zemin üzerine kurulu olan Bolvadin yerleşim bölgesi içersine girer ve bu noktadan itibaren izlenilemez. Fay eğim atımlı normal fay özelliğine sahip olup; fay düzlemleri üzerindeki kinematik göstergeler bu durumu kanıtlamaktadır (Özkaymak vd. 2017, 2019).

Fay düzlemi üzerindeki eğim atımlı normal faylanmanın asal gerilim eksenleri (σ_1 , σ_2 ve σ_3) ilişkili kayma yüzeyi fay çizdiği seti ile hesaplanmış, hesaplanan asal gerilim eksenleri sırasıyla 351 /81, 240 /03, 149 /09 (yönlem/dalım) şeklinde sonuçlanmıştır. Hesaplanan

değerler gerilme rejiminin Bolvadin Fayı üzerinde Kuzeybatı-Güneydoğu yönlü saf genişleme şeklinde olduğunu göstermiştir (Bozkuş 2019, Özkaymak vd. 2017, 2019).

Yalçın (2019); Bolvadin etrafında meydana gelen güncel yüzey deformasyonlarının sebebinin ve miktarının saptanması için Bolvadin civarında 3 ayrı bölgede toplam 2 km'lik bir hatta bulunan elektrik direklerine pirinçten çubuklar tesis edilerek 2016 ve 2017 yılları Ağustos aylarında toplam 2 kampanya ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre deformasyon zonu boyunca, 5 ile 65 mm/yıl arasında düşey deformasyon hızı hesaplanmıştır (Yalçın 2019).

Bozkuş (2019); son 10 yılda Bolvadin ilçe merkezinde asismik yüzey deformasyon miktarı hassas nivelman yöntemi ile belirlenmiştir. Bu deformasyon miktarlarını belirlemek için Bolvadin merkezindeki asismik yüzey deformasyonlarına dik olarak 9 adet nivelman profili tesis edilmiştir ve tesis edilen nivelman profilleriyle nivelman ağı oluşturulmuştur. Bununla birlikte 2016-2018 yılları ağustos ayları arasında 12 kampanya nivelman ölçümleri yapılmıştır. Bölgede yer alan DSİ'ye ait su kuyularının verileri temin edilmiştir. Bu kuyuların su seviyelerinde 24 ayda 5 metre düştüğü saptanmıştır. Yer altı su seviyeleriyle asismik olarak oluşan yüzey deformasyonları arasında kolerasyonu araştırmak için; kendal, Sperman ve Pearson korelasyon metotları kullanılmıştır. Elde edilen neticelerin çerçevesinde 4 ve 5 nolu kuyular hariç yüzey deformasyonları ile yer altı su seviyelerindeki düşüş arasında orta seviyede korelasyon olduğu saptanmıştır (Bozkuş 2019).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deformasyon ve Deformasyon Modelleri

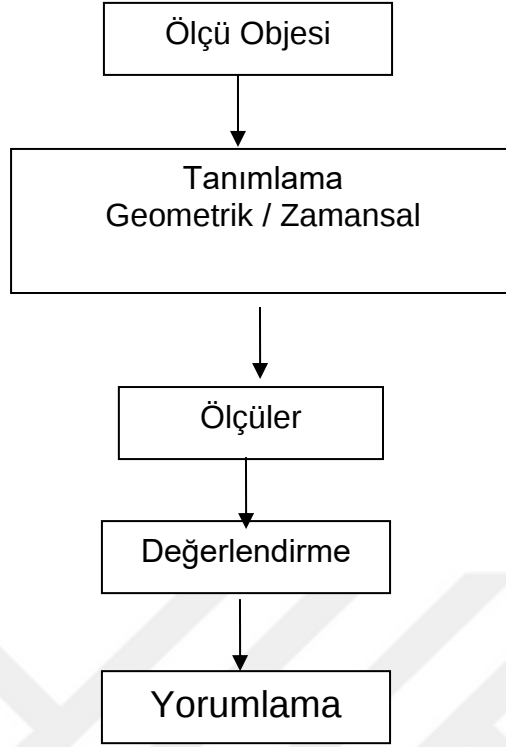
Yer kabuğunda, endüstriyel tesislerde ve çok katlı mühendislik yapılarında devamlı ve devamsız etkiler altında oluşan boyut değişimlerine “ deformasyon ” denir. Bu devamlı ve devamsız tesirler şunlardır;

- Zeminin fiziksel özellikleri
- Bölgedeki yer kabuğu hareketleri
- Yapı etkileyen hareketli dış yükler
- Çeşitli jeolojik ve atmosferik etmenler
- Suyun dinamik basıncı

gibi maddelendirmek mümkündür (Uysal 2012).

3.1.1 Deformasyon Oluşumunun Belirlenmesi ve Elde Edilmesi

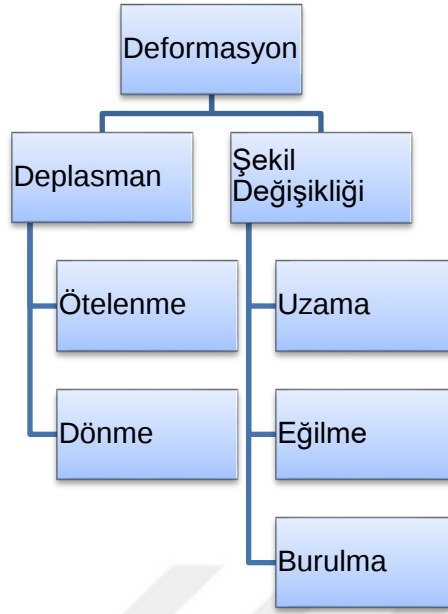
Deformasyon oluşumunun belirlenmesinden ve elde edilmesinden bahsedildiğinde bir biri ile ilişkili olan ölçü teknikleri, değerlendirme teknikleri ve yorumlama bileşenlerinden oluşan üç kısımda ele alınmaktadır. Yorumlama bileşeni de bu arada salt geometrik inceleme, genelleştirilmiş inceleme ve deformasyon oluşumunun fiziksel izahı olarak alt kısımlara ayrılmaktadır (Gülal 2003).



Şekil 3.1 Deformasyon oluşumunun elde edilmesindeki adımlar (Gülal 2003).

3.1.2 Deformasyonların Sınıflandırılması

Gözlem ölçüleri bir objedeki deplasmanların ve şekil varyasyonlarının belirlenmesine hizmet etmektedir. Deplasmandan objenin olduğu çevreye karşı olan ötelenme ve dönmesi; şekil varyasyonlarından ise objedeki geometrik varyasyonlar anlaşılmaktadır. Şekil varyasyonu ve deformasyon terimlerinin aynı anlamda kullanıldığı mekaniğin zıttına, jeodezik terminolojide deplasman ve varyasyonları için deformasyon terimi kullanılmaktadır.

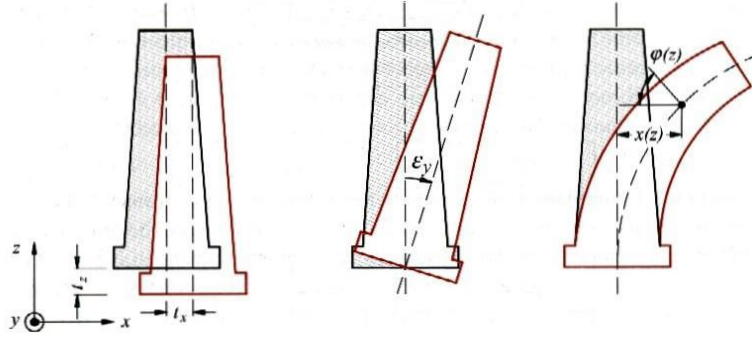


Şekil 3.2 Deformasyonların sınıflandırılması (Gülal 2003).

Bir objenin deplasmanı ötelenme ve dönmeden meydana gelmektedir. Bir objenin deplasmanın da obje üstündeki noktalar bağlantılı olarak hareket etmemektedir.

Ötelenme bir objenin belirli bir yönde hareketini anlatmaktadır. Düşey yöndeki ötelenmelere model olarak binalardaki oturma ve çökmeler gösterilebilir. Dönme 'den bir cismin bir eksen üzerinde yaptığı döngü ortaya çıkar.

Bir objenin iç geometrisindeki varyasyonlar şekil varyasyonu olarak tanımlanır. Şekil varyasyonunda obje noktaları arasındaki geometrik bağ değişmektedir. Objelerin uzaması çekme kuvveti altındaki objenin boyundaki uzama veya basınç kuvveti altında objenin boyundaki kısalmadır. Objenin konstrüksiyon eksenine dik biçimde değişikliği eğilme olarak tanımlanır. Burulma ise objenin konstrüksiyon eksenine boyunca dönmesidir (Gülal 2003).



Şekil 3.3 Kule şeklindeki bir objedeki deplasmanlar ve şekil değişimleri (Gülal 2003).

3.1.3 Deformasyon Ölçümleri Niçin Yapılmalıdır ?

Deformasyon ölçmelerinin amacı; ya somut bir problemin saptanması ya da bir tehlikenin ortaya çıkarılmasıdır. Bu problem veya tehlike zamanında saptanıp gerekli önlemler alınırsa deformasyon ölçmeleri hedeflediği amaca ulaşmış olacaktır.

Deformasyonların tam olarak saptanılıp değerlendirilmesi için zamana bağlı olarak objenin devamlı izlenmesi gereklidir. Deformasyonlara ilişkin değerlendirme yapmak için bir periyottan daha fazla ölçüye ihtiyaç vardır. Burada ilk yapılan ölçmeler sıfır ölçmesi veya kaynak ölçmesi (t_0), ikinci olarak yapılan ölçmeler tekrar veya yenileme ölçüsü (t_1 , t_2) olarak isimlendirilir. Bu iki periyot arasındaki hıza göre ölçülerin tekrarlanma oranı değişir.

Can ve mal kayıplarının en az mertebeye indirilmesi, zaman kayıplarının önüne geçilmesi, önceden tedbir alınmasının sağlanması için, bu tür ölçülerin periyodik veya devamlı izleme yapılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi büyük ölçüde önem taşımaktadır (Uysal 2012).

3.1.4 Deformasyon Ölçümlerinin Uygulama Alanları

Endüstriyel Tesislerin İnşasındaki Ölçmeler: Sanayi ve makina tesislerinin geometrik vaziyetlerini tayin etmek ve denetimi için yapılan ölçmelerdir. Büyük türbinler ve vinç

rayları gibi tesislerin hasarsız çalışması yalnız tesisin içindeki geometrik şartlara uygunluğu ile sağlanır (Uysal 2012).

Mühendislik Yapılarındaki Deformasyon Ölçmeleri: Mühendislik yapılarının, inşa aşamasındaki dikkat ve önlemler kadar önemli olan bir başka konu da mühendislik yapılarının inşasından sonraki denetlemelerdir. Mühendislik yapılarından olan köprü, bina, baraj gibi yapıların denetlenmesinin bir etabında deformasyon ölçümleri ve çözümlemelerini oluşturmaktadır.

Deformasyon ölçmeleri objedeki varyasyonlarla ile birebir orantılıdır. Ayrıca deformasyon ölçmelerinin sağlam bir biçimde yapılması ya da yapılmaması deformasyon çözümlemesini doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple yapılan ölçümlerin olanca özenli yapılması gereklidir (Doğanalp ve Turgut 2009).

Barajlarda Deformasyon Ölçmeleri: Barajlar, farklı yükler altında bulunan önemli ve hassas mühendislik yapılarındandır. Baraj ve yakın bölgesi, bir çok sebebe ilişkin olarak zaman içerisinde deformasyona uğrayabilir. Barajın yapısı, gövdenin ve suyun basıncı, su kütlesinin ağırlığı, gövde içi su basıncındaki varyasyon, yer kabuğu hareketleri ve sıcaklık değişimleri gibi nedenler deformasyonların nedenleri olarak sıralanabilir. Geometrik ve fiziksel varyasyonlara yol açabilen bu etkenlerin gözlemlenmesi ve varyasyonlarının saptanması gerekir. Zamanla oluşa gelen fiziksel ve geometrik varyasyonlar gözlemlenir ve bu varyasyonların anlamlı düzeylerde olup olmadıkları ve ciddi değerlere yaklaşp yaklaşmadıkları belirlenmeye çalışılır. Böylece, zamanında alınacak tedbirlerle yapının verimliliği, güvenliği ve yapıdan beklenen yararın devamlılığı yanında, neden olabileceği zararların da önüne geçilmesi sağlanmış olur. Bilhassa son yıllarda bu konuya olan hassasiyet ve alaka artarak devam etmektedir. Büyük Barajlar gibi önemli mühendislik yapılarında zamanla oluşabilecek deformasyonları gözlemlmek üzere, jeodezik ve jeodezik olmayan birçok metot uygulanmaktadır (Kalkan 2009).

Heyelan Alanlarında Deformasyon Ölçmeleri: Deformasyon ölçmelerinde değişik tekniklerin bir arada uygulandığı alanlardan birisi de heyelanların gözlemlenmesidir. Heyelanlar, zaman zaman mühim ölçüde mal ve can kaybına neden olan tabii olaylar olup gerek köprü, bina, liman, baraj, yol gibi farklı mühendislik yapılarında, gerekse çevresinde önemli derecede zararlara yol açabilmekte ve bazı durumlarda, topografyada derin izler bırakabilmektedir. Ülkemizde olduğu gibi dünyanın birçok yerinde heyelanların gözlemlenmesi ve olası zararlarının önüne geçilmesi veya minimum seviyeye indirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır (Kalkan vd. 2003, Ahmad and Mc Calpin 1999, Barberalla vd. 1988, Çelik vd. 1999, Kalkan et al. 2001, Vichas vd. 2001).

Tektonik Hareketlerin Belirlenmesinde Deformasyon Ölçmeleri: Plaka Tektoniği Teorisine göre; yer kabuğu birbirine göre az veya çok hareket etmekte olan birden fazla plakalardan meydana gelmektedir. Yerkabuğunda meydana gelen depremlerde ortaya çıkan enerji bu plakaların uç kesimlerine/sınırlarında yoğunlaşmaktadır. Bu nedendir ki depremlerin oluşumuna bu tabakaların sebep olduğu inancına ulaşılmıştır. Bu oluşum şiddetli bir depreme neden olmaz (İnal 1990).

Yerkabuğundaki gerilmelere ve depremlere sebep olan küçük yerkabuğu hareketlerinin yönü, yeri ve büyüklüğünün belirlenmesi jeodezik ölçmelerle yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda uygulanacak jeodezik varyasyonlara uygun arazi üzerindeki fay kırıklarını karakterize edebilecek ölçme noktaları tesis edilir. Bu noktalar birbirleri ile jeodezik yöntemlerle ilişkilendirilerek bir denetleme ağı oluşturulur. Her yıl yenilenen ölçmelerden çıkarılan verilerin analizlerinden sonra noktaların ve dolayısıyla temsil ettiği kütlelerin hareketi tespit edilir. Böylece jeodezik olarak tayin edilen yerkabuğu deformasyonları, jeofizik ve jeolojik verilerle birlikte değerlendirilebilir.

Günümüzde deformasyonların büyüklüğü yanında ivmesi, hızı ve hatta ivmesinin zamana sınırlı varyasyonu yüksek hassasiyetli olarak tespit edilebilmektedir. Deformasyonların tespit edilmesinde, bahsi geçen bölgede saptanan karakteristik noktalarda zamana ve/veya etkileyen kuvvetlere sınırlı olarak anlamlı bir hareketin var olup olmadığının tespit edilmesidir (Gürkan vd. 2005).

3.2 Deformasyon Modelleri

Güncel yer kabuğu hareketlerinin tespit edilebilmesi için jeodezik olarak üç ana model vardır. Birinci model, “zamanlar arasında hareket yoktur“ biçiminde sıfır hipotezi kurularak oluşturulan Statik Modeldir. İkinci model, “tüm noktalarda doğrusal ya da ivmesel hareket vardır“ biçiminde sıfır hipotezi kurularak oluşturulan Kinematik Modeldir. Kinematik modeller, zamana bağlı olarak yalnızca nokta hareketlerinin belirlendiği Kinematik Tek Nokta Modelleri; zamana ve konuma sınırlı olarak hareket yüzeylerinin tespit edildiği Kinematik Yüzey Modelleri olarak isimlendirilir. Üçüncü model de hareketin sebebini de ele alan Dinamik Modeldir (Yalçınkaya 2000).

Çizelge 3.1 deformasyon değerlendirme modelleri (Gülal 2003).

Deformasyon Modeli	Uyumluluk Modeli	Kinematik Model	Statik Model	Dinamik Model
Zaman	Model Yok	Zamanın Fonksiyonu Olarak Hareket	Tam Olarak Modellenemez	Zamanın ve Kuvvetin
Etkiyen Kuvvetler	Model yok	Model yok	Kuvvetin Fonksiyonu Olarak Şekil Değişikliği	Fonksiyonu Olarak Hareketler
Objenin Durumu	Yeterli Derecede Dengede	Sürekli hareket Halinde	Kuvvet Altında yeterli derecede dengede	Sürekli Hareket Halinde

3.2.1 Statik Model

Deformasyon değeriendirilmesinde bölge, konu veya yapının karakteristik noktalarının, deformasyon vektörlerinin zamandan ve etkiye kuvvetler den özgür olarak tespitinde statik modelin alanın içine girer. Bu model tüm sistemin bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı varsayılır. Bu tanımıyla statik model jeodezik yöntemlerin en çok uygulama geldiği bir deformasyon çözümleme yoludur (Ünver 1988).

3.2.2 Dinamik Model

Dinamik deformasyon modelinde obje hareketi objeye tesir eden kuvvetler ve zamanın fonksiyonu olarak tarifi edilmektedir. Bu kavramda statik deformasyon modelinin dinamik deformasyon modeline genellemesi objede zamansal olarak da oluşa gelen varyasyonlarda (malzeme özellikleri) modellenmesi kavramına gelmektedir (Gülal 2003).

Dinamik deformasyon modeli bir baraj örneğinde açıklamak isteniyorsa, barajın topladığı suyun hem çevre topoğrafyasına hem de yapıya etkilediği basınç ve basıncın su düzeyine göre değişimi, mevsimlik ısı değişimi ve yapının iç gerilimleri ile yapı çevresindeki yerkağı hareketleri deformasyonların sebebini teşkil etmektedir. Deformasyonların meydana gelmesi, etkiye kuvvetler ile yapı karakteristiklerinin bileşiminden oluşan bir biçim değiştirme fonksiyonu ile olur. Dinamik deformasyon modelinde gaye, bu biçim değiştirme fonksiyonunun belirlenmesi ve sebepleri ile deformasyonların zaman, frekans ve yer bağlantılarının ortaya atılmasıdır (Ünver 1988).

3.2.3 Kinematik Model

Kinematik modelde, deformasyonu gözlemlenecek bölgenin karakteristik noktalarının hareketleri ve bu hareketlerin hızlarıdır.

Deformasyon izlemesinde bahsi geçen bölgenin büyük olması durumunda bütün sistemin bir kez ölçülmesi için uzun bir zamana ihtiyaç olabilir. Örneğin; bir ülkenin tamamında veya büyükçe bir bölgesinde yer kabuğu hareketlerini izlemek üzere o bölümde nivelman ölçüleri her 20-25 yılda bir tekrarlanır. Bu tekrarlama ölçüsü de 4-5 yıl sürebilir. Bu uzun yıl boyunca, nivelman noktalarının tahribata uğramadığı söylenemez. Bu hususta parametre olarak noktaların yükseklikleri yerine yükseklik değişimleri zamanın fonksiyonu olarak anlatılarak düşey hareketlerin hızları alınır (Ünver 1988).

3.2.4 Genelleştirilmiş Deformasyon Modeli

Kinematik modeller, bir jeodezik ağda oluşan biçim değişimlerini (deformasyonları) değerlendirmeye yararlar. Jeodezik ağlarda, kontrol edilen bir objede oluşan deformasyonlar, bu modeller etkisiyle zamana ya da konuma bağlı fonksiyonlar şeklinde genelleştirilebilir. Bahsi geçen fonksiyonlar, konuma ya da zamana bağlı karakterde sade matematiksel fonksiyonlardır. Uygulanan yorumlama yöntemleri, regresyon analizi karakterindedir. Geometrik doğrultuda bakıldığında, ağın yapısına bağlı olmayan dış etki parametreleri, bozucu faktör olarak görülebilir. Bunları indirgeyebilmek için sade kinematik modellerle çalışır. Birçok deformasyon sorunun çözümü için bu yol, ulaşılması amaçlanan gaye anlamına gelmektedir. Bir deformasyon problemi daha bütüncül ve geniş biçimde incelenmek istenirse, kontrol edilen objedeki değişimlerin sebeplerinin neler olduğu sorusu ile karşılaşılır. Sorunun bu şekilde sonuçlandırıldığı durumlarda, dış etki parametrelerinin büyüklük ve karakterleri bahsin de değerlendirme yapabilmek gerekir. Bu çeşitten dinamik modellerin oluşabilmesi için kontrol edilen objenin özellikleri ve malzemelerinin de hatırlanması gerekir. Ancak bu bilgilere ulaşıldığı durumlarda, deformasyonlar ile bunları oluşturan sebepler arasındaki matematik bağlantı kurulabilir. Bahsi geçen modeller, deformasyon modellerinin en kapsamlı şeklini gösterirler (Uysal 2012).

3.3 Jeodezik Yöntemlerle Deformasyon Ölçmeleri

Jeodezik metotlarla ölçme periyotlarına göre ikiye ayrılırlar.

- **Sürekli Ölçme Yöntemi:** Değişim göstermesi beklenen yapının belirli karakteristik bölgesi ya da noktaları sürekli olarak gözlenir.
- **Ayrık Ölçme Yöntemi:** Bu yöntemde karakteristik noktalar belli periyotlara göre ölçülür.

Jeodezik deformasyon ölçme metotları;

- Yatay yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan metotlar;
 - Hassas Poligon Yöntemi
 - Jeodezik Kontrol Ağları Yöntemi
 - Aliynman Yöntemi
- Düşey yöndeki deformasyonların belirlenmesinde uygulanan metotlar;
 - Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi
 - Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemi
 - Hidrostatik Nivelman Yöntemi

şeklinde sınıflandırılabilir (Turan 2007).

Bu çalışmamızda ‘‘Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi’’ kullanılmıştır.

3.3.1 Hassas Geometrik Nivelman Yöntemi

Bu metot düşey yöndeki yer kabuğu hareketlerinin saptanması, mühendislik yapılarındaki deformasyonların saptanması, ülke nivelman ağının kurulması ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Hassas nivelmanın ortalama hatası $\mp 0.5 \text{ mm}/\sqrt{km}$ ’dir. Yüksek duyarlılık gerektiği için kullanılan aletler, noktaların işaretleneceği yerler, ölçü ve hesaplama yöntemleri bu duyarlılığı sağlayacak biçimde seçilmelidir. Yüksek hassasiyet sağlamak için kullanılan aletlerin nitelikleri duyarlılığı artıracak biçimde en uygun hale getirilmelidir (Ünver 1988, Doğan 2019).

Hassas nivelman da yüksek doğruluk göz önündedir. Bu doğruluğa elde etmek için kullanılan dijital nivoların düzeçleri ölçüm zamanınca kontrol edilmelidir. Bununla birlikte aletlerden dolayı oluşan hataları minimuma indirgeyebilmek için cihaz kalibrasyonları yapılmalıdır. Kullanılan invar miralar üzerine eklenecek düzeçler yardımıyla diklikleri kontrol altında olmalıdır. İnvar miraların da kalibrasyonları yapılarak aletten dolayı oluşacak hatalar minimuma indirilmelidir. Ayrıca aşağıda belirtilen ölçü prensiplerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

1. Hassas nivelman da ölçüm zamanı olarak sabah ve akşamüstü saatleri belirlenmelidir. Bu saatlerde refraksiyon hatası en aza inmektedir.
2. Kullanılan mira çarıkları öncelikle sağlam yerlere sabit ve düzgün biçimde koyulmalıdır ve daha sonra miralar altlıkların üstüne tutulmalıdır.
3. Alet kurma sayısını çift yaparak miraların sıfır hatasını gidermek mümkündür
4. Alet ile mira arası normal şartlarda 35-40 m'yi geçmemelidir ve sabit aralıklarla ilerlenmelidir, hava koşullarının uygun olmaması durumunda mesafe 25 m'yi geçmemelidir. Hassasiyeti daha da fazla arttırmak için bu mesafe 20 m civarı olmalıdır.
5. Rüzgârlı havalarda miranın düzeçte tutulması zorlaşacağı için bu tür havalar tercih edilmemelidir.
6. Refraksiyon etkisinden okumaların etkilenmemesi için miralarda 0,60 m'den daha yüksek değerler okunacak şekilde aletler ve mira konumlandırılmalıdır (Doğan 2019).

3.3.2 Hassas Geometrik Nivelman Ölçümünde Kullanılan Alet ve Donanımlar

Hassas nivelman ölçmelerinde kullanılan aletler sayısal nivolar, invar mira, mira çarıkları, miraları düzeçte tutmak için kullanılan aparatlar ve düzeçlerdir.

Bu ölçü metodunda geometrik nivelmandan değişik olarak çift rakamlandırılmış değişmez (invar) miralar kullanılmaktadır (Şekil 3.4). Bu miraların kullanılma sebebi; invar şerit kullanılmasının genleşme katsayısı az olmasıdır. İnvar miraların seçilmesinin gayesi miraların açılıp kapanması sonucu oluşabilecek hatalar ile nem ve sıcaklık

farklılıklarından doğacak olan hata oranını minimuma indirmek ve hassasiyeti artırmaktır. İnvar miralar kullanım gayesine göre 2 m ve 3 m olarak kullanılabilir. Ölçme biçimi ve ölçüm yapılacak arazi uygun ise 2m'lik invar miralar kullanılmalıdır. Miraların üretildiği malzeme kontrol edilerek alınmalıdır. İnvar miralarda genleşme göz önünde bulundurularak hassasiyeti düşürmesi engellenmelidir. Miraların barkotlu kısımlarının hasar görmemesine özen gösterilmelidir.



Şekil 3.4 İnvar mira ve mira altlığı (Doğan 2019).

Sayısal nivolar kendi içerisindeki hatayı gidermeye yarayan kompensatörlü nivolardır. Kompensatör sayesinde gözle ayırt edilemeyecek düzeçleme kusurları otomatik olarak giderilmektedir. Sayısal nivolarla klasik nivolar arasındaki ayrım elektronik bölümünün bulunmasıdır. Bu elektronik algılayıcılar barkod miralardaki barkod şeritleri algılayarak tespitini yapar. Değerlendirme sonunda mirada ki düşey mesafe okuması ve gözleme düzleme uzaklığına ulaşılır. Sayısal nivolar marka ve modele göre çeşitlilik gösteren nivelman verilerini kaydeden, depolayan, işleyen ve gerektiğinde okunabilen, düzeltmeler getirebilen programlarla desteklenmiştir (Doğan 2019).

3.3.3 Hassas Geometrik Nivelman Ölçümünde Kullanılan Yöntemler

Pratikte hassas nivelman ölçülerinde kullanılan nivelman ölçü yöntemleri, G=geri okuma, I=ileri okuma olmak kaydıyla şunlardır.

1. GIIG
2. IGGI

3. GGII
4. IIGG
5. GIGI
6. IGIG

Bunların dışından düşünölen GIGI veya IGIG yöntemi hem nivelmanın hızı hem de düşey hareketleri elimine etmesi bakımından uygun değildir.

Bu yöntemlerden yaygın kullanılanı GIIG yöntemidir. Bu yöntemlerin her birinde iki değör okuması yapılır. Bu değörlerin aritmetik ortalaması alınarak hassasiyet artırılır ve yapılacak hatalar anında müdahale edilerek ortadan kaldırılırlar. Bu durum gidiş ve dönüş nivelmanı olarak düşünölecek olursa dört farklı okuma değeri elde edilerek hassasiyet üst seviyelere çıkarılmış olur (Ünver 1988, Doğan 2019).

3.3.4 Hassas Geometrik Nivelman Hata Kaynakları

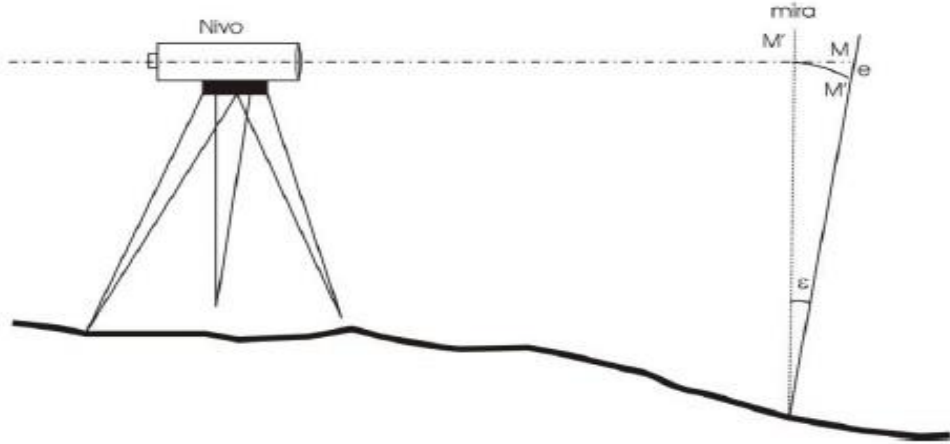
Hassas nivelman ölçümlerine etki eden hatalar, hem yükseklik farklarının sonuçlarını, hem de doğruluk parametrelerini etkilemektedir. Bu sebeple hataların hangi sebeplerden kaynaklandığı bilinmesi lazımdır. Dikkat edilmez ise güvenilir ve hassas netice elde etmek güçleşir ve bilimsel sonuç ve yargılara ulaşılamaz. Hassas nivelmanı etkileyen hata kaynakları iki başlık altında sıralanabilir (Ceylan 1993, Doğan 2019).

1. Nivo ve miralardan kaynaklanan (aletsel) hatalar
2. Dış ortamdan kaynaklanan hatalar

Aletin sebep olduğu hatalar, hassas nivelman ölçmeleri için nivonun sehpa gibi bir teçhizata sabitlenerek düzeçte olması lazımdır. Bu koşulu sağlamamasının sebepleri, nivo gözleme düzleme eksenini kayıklığı, kompensatörlü nivolar da kompensatörün kalibre hatası ve küresel düzecin düz ve yatay eksen koşulunun sağlamamasından meydana gelen hatalardır. Hassas nivelman da ölçüm işlemlerinde teçhizat olarak mira kullanıldığından dolayı miradan oluşan hatalar vardır, bunların nivelman neticesine etkisi oldukça fazladır. Bazı hatalar şu şekilde sıralanabilir;

1. Miranın düz tutulmaması hatası
2. Mira çifti sıfır konum hatası
3. Mira tabanının düzlem olmaması hatası
4. Mira bölümlendirme hatası

Hassas nivelman ölçmelerinde miraların çekül doğrultusuna paralel ve düzdekte olması lazımdır. Rüzgârın etkisi, mirayı tutan kişinin ilgisizliği ve yorgun olması neticesinde mira düşey doğrultudan çıkabilir ve bu sapmalar sonucunda mesafeye de şartlı olarak miranın düşeyden ε kadar sapması her mira okumasında işareti pozitif olan bir hataya sebebiyet vermektedir. (Şekil 3.5) Bu gibi hataların oluşmaması için mira da kullanılan küresel düzeçlerin her zaman gözlemlenerek kontrol altında tutulması gerekmektedir.



Şekil 3.5 Mira eğiklik hatası (Ceylan 1993).

Hassas nivelman da ölçmelerinde kullanılan invar miraların, invar şeridin mira kasasına tam olarak yerleştirilmemesinden veya mira tabanının düzlüğünü yitirmesi nedeniyle mirada sıfır konum hatası olabilir. Mira çifti sıfır konum hatasını yok etmek için ölçüm esnasında gidiş dönüş mantığına dayandırılarak istasyon âdeti çift olarak alınır ve o anda hatanın etkisi bulunur ve ortadan kaldırılır (Ceylan 1993, Doğan 2019).

Hassan nivelman da kullanılan miraların alt kısımlarının aşınmamış, düzlem ve invar şeride yani yatay düzleme dik olması gerekir. Alt kısmının düz olmaması durumunda sıfır

konum hatasıyla karşılaşılır. Mira çarığına tutulan mira her daim çarığın aynı noktasına ve mira tabanında her daim aynı noktaya gelecek biçimde altlığa oturtulmalıdır. Dış ortamdan kaynaklanan hatalar, ölçümler yeryüzünde yapıldığından fiziksel değişiklikler hataya sebep olmaktadır. Bu hatalar;

- Nivo ve miranın çökme hatası
- Manyetik alanların kompensatörlü nivoları etkisi
- Sıcaklığın nivo ve miraya etkisi
- Düşey refraksiyon etkisi
- Gravite alanının etkisi (Doğan 2019).

3.4 Jeodezik Ağlarının Dengelenmesi

Jeodezik ağlara ait ölçülerin dengeleme ile değerlendirilmesi matematik modellere dayanır. Yapılan dengelemenin güvenilir olabilmesi için oluşturulan matematik modelinin ölçüler ile bilinmeyenler arasındaki fiziksel ve matematiksel ilişkileri gerçeğe en yakın biçimde aktarılması gerekmektedir. Dengeleme neticesi hesaplanan parametrelerin duyarlık ve güven ölçütlerine lakin oluşturulan modelin doğru ve tam olması koşuluyla elde edilebilir. Bilinmeyenlerin en elverişli değerlerini veren tek anlamlı çözüm elde edebilmek için En Küçük Kareler İlkesi uygulanır. Bu prensibe göre düzeltmelerin kareleri toplamının minimum olması gerekmektedir (Bozdemir 2006).

3.4.1 Gauss-Markoff Modeli

Jeodezik ağlarda dengelemenin yapılabilmesi için, ölçülerle bilinmeyenler arasında matematiksel olarak bir bağlantı modeli oluşturulması gerekmektedir. Gauss-Markoff modeli, fonksiyonel ve skolaistik bağıntılardan oluşan lineer bir matematik modelidir.

$$E(I) = \underline{A} \underline{x} \quad (3.1)$$

$$E(\underline{\varepsilon}\underline{\varepsilon}^T) = \underline{\Sigma}_{11} = \sigma_0^2 \underline{P}^{-1} \quad (3.2)$$

ile verilmektedir. Bu model n ölçü sayısı, u bilinmeyen sayısı olmak üzere,

$\underline{l}$: (nx1) boyutlu ölçü vektörü

$E(\cdot)$: Ümit değer operatörü

$\underline{x}$: (ux1) boyutlu bilinmeyen parametreler vektörü

$\underline{A}$: (nxu) boyutlu katsayılar matrisi

$\underline{\varepsilon}$: (nx1) boyutlu gerçek hata vektörü

$\underline{\Sigma}_{11}$: (nxn) boyutlu ölçülerin varyans kovaryans matrisi

σ_0^2 : öncül (a-priori) varyansı

$\underline{Q}_{11}$: (nxn) boyutlu ölçülerin kofaktörler matrisi

$\underline{P}$: (nxn) boyutlu ölçülerin ağırlık matrisi

$\underline{v}$: (nx1) boyutlu düzeltmeler vektörü

göstermektedir (Caspary 1988, Tekdal 2007). Bu modelde ölçülerin ümit değeri, bilinmeyen parametreler vektörü x ve katsayılar matrisi A'nın lineer bir kombinasyonu şeklinde ifade edilir. Eğer ilişki lineer değilse lineerleştirilir. Ölçülerin rastlantısal hatalarının bilinmeyenler üzerindeki etkisini azaltmak için ölçü sayısı n, parametre sayısı u'dan yeterince büyük olmalıdır (Erol 1999).

$n > u$ olduğundan, $E(\underline{l})$ yerine yazılacak $\underline{l}$ ölçü vektörü ile (3.1) eşitliği tutarsız olur. Bu tutarsızlık ölçülere bir tutarsızlık parametresi $\underline{v}$ eklenmesiyle giderilir. Bu durumda fonksiyonel model,

$$\underline{\hat{l}} = \underline{l} + \underline{v} = \underline{A} \underline{\hat{x}} \quad (3.3)$$

girer. Burada ölçüler ve x parametreleri üzerindeki ^ işareti söz konusu elemanların kestirim değeri anlamını ifade etmek için kullanılmaktadır. $\underline{\hat{l}}$, $\underline{\hat{x}}$, ölçülerin ve bilinmeyenlerin kestirim değerleri, başka bir deyişle dengelenmiş değerleri olup, ümit değerden farklıdır. Ancak ümit değer sağladığı şekline bütün matematiksel bağıntıları

sağlama özelliğine sahip, en olasılıklı ve minimum varyanslı hesap (dengelenmiş) değerleridir (Tekdal 2007).

3.4.2 Serbest Ağ Dengelemesi

Ağın konumu, ölçeği, yönlendirilmesi ile ilgili zorlamaları yok eden ve nokta duyarlıklarını gerçekçi biçimde yansıtan serbest ağ dengelemesi deformasyon analizinde sık olarak kullanılmaktadır (Gülal 1992, Turan 2007).

Kenar ağlarında uzunluklar, doğrultu ağlarında doğrultular, GPS ağlarında üç boyutlu koordinat farkları (kod, faz ve zaman ölçülerinden) ölçülür. Bu ölçüler doğrultusunda jeodezik ağın belirli bir koordinat sisteminde yeri, ölçeği ve yönü konusunda hiçbir bilgi içermezler. Bu ölçüler kapsamında oluşturulan jeodezik ağlara ise serbest ağlar denir.

Bir jeodezik ağın tanımlı bir koordinat sistemindeki ölçeği, yeri ve yönü konusunda bilgi veren parametrelere DATUM parametreleri denir.

- Bir trigonometrik veya nivelman ağının bir koordinat sisteminde tanımlı olabilmesi için en az bir noktasının yükseklik koordinatı o koordinat sisteminde bilinmesi gerekir.
- Bir doğrultu ağının bir koordinat sisteminde tanımlı olabilmesi için en az iki noktasının koordinatları bilinmelidir.
- Bir doğrultu-kenar ağının bir koordinat sisteminde tanımlı olabilmesi için en az bir noktasının koordinatları bilinmelidir ve en az bir doğrultusunun yönü bilinmelidir.
- Bir GPS ağının bir koordinat sisteminde tanımlı olabilmesi için en az bir noktasının X, Y ve Z koordinatları o koordinat sisteminde bilinmesi gerekir (Bayrak 2011).

Çizelge 3.2 Jeodezik ağlarda datum parametreleri (Gülal 1992)

Ağ Tipi	Datum Defekti	Datum parametreleri		
		Öteleme	Dönüklük	Ölçek
Yükseklik Ağı	1	1	-	-
Kenar Ağı	3	2	1	-
Doğrultu Ağı	4	2	1	1
Üç Boyutlu Ağ	7	3	3	1

Bir jeodezik ağ dengelemesinde ağıdaki birtakım noktalara dayalı olarak (zorlamasız dengeleme) koordinatları hesaplanan yeni noktaların koordinatları ve koordinatların doğrulukları, koordinatı değişmez alınan noktalardan etkilenir. Bunun nedeni bu jeodezik ağda yapılan ölçülere ait hatalar sadece yeni noktaların koordinatlarına dağıtılır. Biriken hatalar, sabit alınan noktalardan uzaklaştıkça yeni noktaların konum hatalarını büyütür. Bu sebepten dolayı noktaların konum doğruluğu seçilen datuma göre değişir. Bu durumu dayalı olarak jeodezik ağların etkilenmemesi için serbest ağ dengelemesiyle (tüm iz minimum yöntemine göre dengeleme) dengelenir. Bu metotta jeodezik bir ağda yapılan tüm ölçülerden oluşan hatalar bütün nokta koordinatlarına dağıtılır.

Serbest ağ dengelemesi metodu genellikle deformasyon araştırma konularında kullanılır. Deformasyon inceleme gayesiyle oluşturulan jeodezik ağlarda noktaların koordinatları ve koordinatların doğrulukları deformasyon incelemesinde kullanılan giriş değerlerdir. Deformasyon değerlendirilmesi ve yorumu açısından serbest ağ dengelemesiyle bu değerlerin elde edilmiş olunması tercih edilmektedir.

Serbest ağ dengelemesinde bütün noktalar bilinmeyen nokta olarak incelenir. Bu sebeple normal denklem katsayıları matrisinin determinantı sıfır olur. Yani bu matris singüler bir matristir.

Fonksiyonel Model

Skolastik Model

$$\underline{v} = \underline{A} \cdot \underline{x} - \underline{l}$$

$$\underline{P}_l = \underline{Q}_l^{-1}$$

Ağırlıkları Farklı ve Korelasyonlu ölçüler için amaç fonksiyonu

$$\underline{v}^T \underline{Q}_l^{-1} \underline{v} = \underline{v}^T \underline{p} \underline{v} = \min \quad (3.4)$$

$$\begin{matrix} \underline{A}^T & \underline{p} \underline{A} & \underline{x} - & \underline{A}^T \underline{p} \underline{l} = 0 \\ N & n \end{matrix} \quad \text{Matris formatında Normal denklemler}$$

$$\text{Normal Denklem Katsayılar matrisi} \quad \underline{N} = \underline{A}^T \underline{p} \underline{A} \quad (3.5)$$

$$\text{Bilinmeyenler Vektörü} \quad \underline{x} \quad (3.6)$$

$$\text{Sabit Terimler} \quad \underline{n} = \underline{A}^T \underline{p} \underline{l} \quad (3.7)$$

Determinantı sıfır olan normal denklem katsayıları matrisinin $\text{iz}\{N^+\} = \min$ ve $\underline{x}^T \cdot \underline{x} = \min$ şartlarını sağlamak üzere Moore Penrose tersi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\underline{N}^+ = (\underline{N} + \underline{G} \underline{G}^T)^{-1} - \underline{G} \underline{G}^T \quad (3.8)$$

Normal denklemlerin çözümü ve bilinmeyenlerin hesabı aşağıdaki gibi yapılır.

$$\underline{x} = \underline{N}^+ \cdot \underline{n} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki çözüm aşağıdaki eşitlikleri sağlar.

$$\underline{G}^T \cdot \underline{x} = 0, \quad \underline{A} \cdot \underline{G} = 0, \quad \underline{G}^T \cdot \underline{n} = 0, \quad \underline{N}^+ \cdot \underline{G} = 0$$

Burada $\underline{G}$ matrisi ağıın dutumunu belirler. p Ağdaki nokta sayısı olmak üzere bazı ağlar için $\underline{G}$ matrisleri aşağıdaki gibidir.

Nivelman ve Trigonometrik nivelman ağlarında $\underline{G}$ matrisinin boyutu $(p, 1)$ kadardır.

$$\underline{G}^T = \left[\frac{1}{\sqrt{p}} \frac{1}{\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{p}} \right]_{(1,p)} \quad (3.10)$$

GPS ağlarında $\underline{G}$ matrisinin boyutu $(3p, 3)$.

$$\underline{G}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \vdots & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \vdots & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \vdots & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \vdots & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & \vdots & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & \vdots & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} \end{bmatrix}_{(3,3p)} \quad (3.11)$$

Doğrultu ağlarında $\underline{G}$ matrisinin boyutu $(2p, 3)$ kadardır.

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & -y_1'' & x_1'' \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & x_1'' & y_1'' \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & -y_1'' & x_1'' \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & x_1'' & y_1'' \end{bmatrix}_{(2p,4)} \quad (3.12)$$

Doğrultu-Kenar ağlarında $\underline{G}$ matrisinin boyutu $(2p, 3)$ kadardır.

$$\underline{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & -y_1'' \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & x_1'' \\ \dots & \dots & \dots \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & -y_p'' \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & x_p'' \end{bmatrix}_{(2p,3)} \quad (3.13)$$

Doğrultu ve Doğrultu kenar ağlarında x_i'' ve y_i'' normlandırılmış koordinatlardır. Normlandırma işleminin amacı $\underline{G}$ matrisinin kondüsyonun bozulmasını sağlamaktır. Bir ağda x_i'' ve y_i'' koordinatlar olmak üzere koordinatların aritmetik ortalaması yani ağırlık merkezinin koordinatları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$X_g = \frac{[x_i]}{p} \quad (3.14)$$

$$y_g = \frac{[y_i]}{p} \quad (3.15)$$

Koordinat eksenlerinin başlangıcının ağırlık sistemine kaydırılmış koordinatları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x_i' = x_i - x_g \quad (3.16)$$

$$y_i' = y_i - y_g \quad (3.17)$$

Normlandırma elemanı

$$c = \frac{1}{\sqrt{(x_i')^2 + (y_i')^2}} \quad (3.18)$$

Normlandırılmış koordinatlar

$$x_i'' = c \cdot x_i' \quad (3.19)$$

$$y_i'' = c \cdot y_i' \quad (3.20)$$

(Bayrak 2011)

3.4.2.1 Tüm İz Minimum Çözümü

Tüm iz minimum çözümü, ağın bütün noktalarının datum tanımına katkıda bulunmasını öngören bir serbest dengelemedir. Buna göre, koordinat bilinmeyenleri vektörünün normu ve bunların kofaktörler matrisinin izi minimum olur.

Bu çözümün doğrusallaştırılmış fonksiyonel modeli, düzeltme denklemleriyle koordinat bilinmeyenleri arasındaki şart denklemlerinden oluşur (Demirel 2001, Turan 2007).

$$v = A x_g - l \quad (\text{Düzeltilme Denklemleri}) \quad (3.21)$$

$$G^T x_g = 0 \quad (\text{Koşul Denklemleri}) \quad (3.22)$$

$x_g \rightarrow$ Koordinat bilinmeyenleri vektörü, ağın tüm noktalarını içerir.

$G \rightarrow$ Ağın datumunu tanımlar. Tüm noktalar datum tanımına katılır.

Koşul denklemleri sayısı, datum parametrelerinin sayısına eşittir. Nivelman ağları için normlandırılmış G^T matrisi ;

$$G^T = \frac{1}{\sqrt{p}} [111 \dots 1] \quad (3.23)$$

şeklindedir.

Bilinmeyenlerin kareleri toplamının minimum olması koşulunu sağlayan tek anlamlı çözüm, normal denklem katsayılar matrisi N' in tersi Moore Pensore yöntemine göre;

$$N^+ = (N + GG^T)^{-1} - G(G^T GG^T G)^{-1} G^T \quad (3.24)$$

Bağıntısı ile hesaplanır.

Normal denklem katsayılar matrisinin Pseudo tersini alma işlemi için diğer bir çözüm $N^+ = S D^{-1} S^T$ ' dir. N matrisinin sıfırdan farklı öz değerlerinden oluşan köşegen matris D ve buna karşılık gelen normlandırılmış öz değerler matrisi S ile işlem yapılır. Buna göre;

$$Q_g = N^+ \quad (3.25)$$

Yazılabilir. Küçültülmüş bilinmeyenler,

$$x_g = N^+ n = Q_g n \quad (3.26)$$

şeklinde hesaplanır (Gülal 1992, Turan 2007).

3.4.2.2 Kısmi İz Minimum Çözümü

Bu çözüm, ağırlık katsayıları matrisinin buna karşılık alt matrisinin izinin en küçük olmasını ve ağıın tüm noktalarını kapsayan küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri vektörünün bir kısmının normunun, yani ağıın noktalarından yalnızca bir bölümünün datum tarifine katılmasını öngören serbest ağ dengelemesidir. En uygun konumlandırma, ağıın sadece datum tarifine girilen noktalar kısmında gerçekleştirilmektedir (Demirel 2001, Turan 2007).

Kısmi iz minimum çözümünün fonksiyonel modeli oluşturulurken, tüm iz minimum yönteminin fonksiyonel modelindeki G yerine, G matrisinden datum tanımına katılmayan

noktalara karşılık tüm elemanlar için “0” yazılarak elde edilen bir B matrisi geçmektedir. Bu durumda fonksiyonel model;

$$v = Ax_i - l \quad (\text{Düzeltilme denklemleri}) \quad (3.27)$$

$$B_i^T x_i = 0 \quad (\text{Koşul denklemleri}) \quad (3.28)$$

biçimindedir.

Koordinat bilinmeyenlerinin Q_i ağırlık katsayıları matrisi, N normal denklem katsayıları matrisinin genel inversidir. Küçültülmüş bilinmeyenler;

$$Q_i = N^{-1} \quad (3.29)$$

$$x_i = Q_i n \quad (3.30)$$

$$Q_i = (N + B_i B_i^T)^{-1} - G(G^T B_i B_i^T G)^{-1} G^T \quad (3.31)$$

şeklinde elde edilir (Turan 2007).

3.4.2.3 Klasik Dengeleme

Datum tanımı için defekt sayısı kadar koordinat bilinmeyeninin seçildiği kısmi iz minimum çözümdür. E matrisinin köşegeni üzerinde datum noktalarına karşılık 1, diğerleri için 0 değeri yazılır. x küçültülmüş bilinmeyenleri vektörü içinde datum noktaları ilk sırada x_i ‘i, diğerleri x_2 ‘yi oluştursun. Çözüm sonucu $x_1 = 0$ ve Q_i matrisinin x_1 alt vektörüne karşılık satır ve sütun elemanları 0 çıkar. Buna göre;

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_{x_2 x_2} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$x_2 = Q_{x_2 x_2} n_2 \quad (3.33)$$

olur.

A matrisinin x_2 bilinmeyenlerine karşılık bölümü A_2 ile gösterilirse, ağırlık katsayılar matrisi ve sabit terimler,

$$Q_{x_2x_2} = (A_2^T P A_2)^{-1} \quad (3.34)$$

$$n_2 = A_2^T P l \quad (3.35)$$

olur. Küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri;

$$Q_2 = Q_{x_2x_2} n_2 \quad (3.36)$$

şeklinde hesaplanır. (Gülal 1992, Turan 2007)

3.4.2.4 S – Dönüşümü

Yeni bir dengeleme yapmaksızın, bütün serbest ağ dengelemelerinin sonuçları arasında bir S matrisiyle yapılan dönüşümlere S- dönüşümü ismi verilir. Bu dönüşüm deformasyon analizinde büyük kolaylık sağlar.

Zorlamasız klasik dengeleme sonuçları S_g ve S_i matrisleriyle tüm iz minimum ve kısmi iz minimum sonuçlarına dönüştürülebilir. Bu matrisler,

$$S_g = E - G(G^T G)^{-1} G^T \quad (3.37)$$

$$S_i = E - (B_i^T G)^{-1} G_i^T \quad (3.38)$$

şeklindedir. Bu eşitliklerde E matrisi birim matristir.

Örneğin, zorlamasız klasik dengeleme sonuçları x_k ve Q_k ise tüm iz minimum sonuçları,

$$x_g = S_g x_k \quad (3.39)$$

$$Q_g = S_g Q_k S_g^T \quad (3.40)$$

ve kısmi iz minimum sonuçları,

$$x_i = S_i x_k \quad (3.41)$$

$$Q_i = S_i Q_k S_i^T \quad (3.42)$$

Eşitlikleriyle elde edilir (Aydın 2001, Turan 2007).

3.4.3 Nivelman Ağlarında Uyuşumsuz Ölçü Testi

Ölçme sırasında yapılan okuma yazma hataları, yanlış hedefe gözlem yapma gibi nedenlerle oluşan kaba hataların büyük kısmı düzeltme denklemlerinin kurulması esnasında durağan terimlerde kendini gösterirler ve gözlemler yenilenerek düzeltilirler. Fakat rastgele ölçü hatalarına çok benzeyen büyüklükte olan kaba hatalar kolaylıkla fark edilmezler ve degeleme hesabı tamamlandıktan sonra uygulanan uyumsuz ölçüler testi aracılığıyla sonuçlandırılır.

Bir l_i ölçüsünde Δ_i kadar, gelişigüzel ölçü hataları sınırından büyük bir hata varsa bu ölçü kümesi olağan dağılıma uymaz ve Δ_i hatası düzeltmeler vektörü v 'yi tesir eder. Bir ölçüdeki Δ_i hata varsayımı ile ölçüler vektörü;

$$l' = l + e_i \Delta_i \quad (3.43)$$

Şeklinde yazılabilir. Burada l' hatalı ölçü; l hatasız ölçü ve

$$e_i^T = [0 \quad 0 \quad . \quad . \quad . \quad 1 \quad . \quad . \quad . \quad 0 \quad 0] \quad (3.44)$$

şeklindedir.

Bir ölçüdeki hatayı saptayabilmek için onun bütün dengeleme sonuçlarına, özellikle düzeltmelerin kareleri toplamı $v^T P v$ 'ye olan etkisini incelemek gerekir.

Dengeleme modelinden l_i ölçüsüne ait düzeltme denklemi çıkarılarak kalan düzeltmeler vektörü v_i , l_i dışında kalan ölçülere ilişkin ağırlık katsayıları matrisi P_{11} ile gösterilerek ölçülerin korelasyonsuz olduğu varsayımı ile;

$$\Omega_1 = v_1^T P_{11} v_1 \quad (3.45)$$

yazılabilir. Buradan l_i ölçüsünün düzeltmeler toplamına etkisi

$$\Omega = v^T P v = l^T P Q_{vv} P l \quad (3.46)$$

eşitliği de gözönüne alınarak

$$\Omega - \Omega_1 = \frac{v_i^2}{q_{v_i v_i}} \quad (3.47)$$

Bağıntısıyla bulunabilir. Bu bağıntıdan hareket edilerek Ω_1 yeni bir dengelme yapılmadan

$$\Omega_1 = \Omega - \frac{v_i^2}{q_{v_i v_i}} \quad (3.48)$$

şeklinde elde edilir. $q_{v_i v_i}$, düzeltmelerin ters ağırlık matrisi Q_{vv} 'nin i . Köşegen elemanıdır. Hatalı kabul edilen l_i ölçüsünün bulunmadığı modelden dengeleme sonrası varyans

$$s_0^2 = \frac{\Omega_1}{f_1} \quad (3.49)$$

$$f_1 = n - u - 1 \quad (3.50)$$

hesaplanabilir (Ünver 1994).

3.4.3.1 Data – Snooping Yöntemi

Hatalı ölçünün ortaya koyulması için n sayıda ölçünün her biri sıfır hipotezi

$$H_0 : E(\Delta_i) = 0 \quad (3.51a)$$

ve seçenek hipotezi

$$H_s : E(\Delta_i) \neq 0 \quad (3.51b)$$

ile test edilir. n sayıda hipotezin her biri için ölçülerin korelasyonsuz olduğu varsayımı ile

$$W_i = \frac{|v_i|}{\sigma_{v_i}} = \frac{|v_i|}{\sigma \sqrt{qv_i v_i}} \sim N(0,1) \quad (3.52)$$

test büyüklüğü kullanılabilir. W_i test değeri BAARDA tarafından “Data – Snooping” değeri olarak adlandırılmıştır. (3.52) eşitliğindeki σ , teorik ortalama hatayı göstermektedir.

W_i test büyüklüklerinden en büyüğü W_{max} normal dağılımdan üretilen sınır değerden daha büyük oluyorsa,

$$W_i = W_{max} = \frac{|v_i|}{\sigma \sqrt{qv_i v_i}} > N_{1-a_0/2} = \sqrt{F_{(1,\infty,1-a_0)}} \quad (3.53)$$

i ölçünün uyuşumsuz olduğu varsayılır. Duruma göre o ölçü çıkarılır veya tekrardan ölçülür.

Sonra tekrar dengeleme yapılır. Bu işleme uyuşumsuz ölçü kalmayıncaya kadar devam edilir.

$a_0 = 0.001$ için $\sqrt{F_{(1,\infty,1-a_0)}} = 3.29$ olacağından (3.53) eşitliğine göre

$$|v_i| > 3.29\sigma_{v_i} \quad (3.54)$$

olan, düzeltmesi standart sapmasının yaklaşık 3 katı olan ölçü, uyuşumsuz kabul edilir (Ünver 1994, Uysal 2012).

3.4.3.2 Tau-Testi

Dengeleme öncesi teorik standart sapma σ yeterli yaklaşıklıkla bilinemiyorsa, test için uyuşumsuz ölçülerin de fonksiyonu olan dengeleme sonrası birim ölçünün ortalama hatası m_0 kullanılabilir. Sıfır ve seçenek hipotezleri olarak (3.51) eşitlikleri kabul edilerek, test büyüklüğü

$$T_i = \frac{|v_i|}{m_{v_i}} = \frac{|v_i|}{m_0\sqrt{qv_i v_i}} \quad (3.55)$$

biçiminde önerilmiştir. T_i test büyüklüğü f serbestlik dereceli τ (tau)-dağılımındadır.

τ -dağılımı'nın sınır değeri C_s ise, herhangi bir T_i 'nin C_s değerinden büyük olma olasılığı şöyle hesaplanabilir.

Tüm T_i ($i=1,2,\dots,n$)'lerin birlikte elde edilme olasılığı bunların olasılıkları çarpımına eşittir. Test büyüklükleri arasında korelasyonlar hesaba katılmazsa toplam olasılık

$a = 1 - (1 - a_0)^n$ dir. a_0 , bir tek ölçünün testi için yanılma olasılığını göstermektedir.

Toplam olasılık a verilirse ($a = 0.05$) yaklaşık olarak

$$a_0 \cong 1 - (1 - a)^{\frac{1}{n}} \cong \frac{a}{n} \quad (3.56)$$

elde edilir.

Ölçü sayısı arttığında öngörülen a değerine göre hesaplanan a_0 çok küçük çıkabilir ve test duyarlı olmaz. Bu durumda a_0 sabit alınıp ($a_0 = 0.001$) gerekirse toplam olasılık a 'yı buna göre hesaplamak uygun olur. Ayrıca incelenen ağ küçük bölümlere ayrılarak bu sakınca giderilir.

Test büyüklüklerinden en büyüğü T_{max} , serbestlik derecesi f , yanılma olasılığı a_0 olmak üzere belirlenen $C_s = \tau_{(f, 1-a_0)}$ sınır değerinden büyükse

$$T_{max} \geq C_s \quad (3.57)$$

İlgili ölçünün uyuşumsuz olduğuna karar verilir. Bu ölçü atılır ya da yenilenir. Bu işleme Data-Snooping yöntemindeki gibi ardışık dengelemelerle devam edilir (Ünver 1994, Uysal 2012).

3.4.3.3 t-Testi

Test büyüklüğünün, Tau-testinde (3.55) eşitliğiyle hesaplanmasında teorik olarak küçük bir ihmal vardır. Eğer l_i ölçüsünde Δ_i kadar bir kaba hata varsa, geçerli olmayan dengeleme modelinden hesaplanan m_0 değeri model hatalarından arındırılmış düzeltmelerden hesaplanmalıdır. Dengelemeyi yenilemeden model hatalarından arındırılmış birim ölçünün varyansı s_0^2 ,

$$s_0^2 = \frac{1}{f-1} \left(f m_0^2 - \frac{v_i^2}{q v_i v_i} \right) \quad (3.58)$$

hesaplanabilir. Test büyüklüğü,

$$t_i = \frac{|v_i|}{s_0 \sqrt{q v_i v_i}} \sim t_{f-1} \quad (3.59)$$

oluşturulur. Bu büyüklük $f-1$ serbestlik dereceli t -dağılımıdır. t_i test değerinden en büyüğü t_{max} , serbestlik derecesi $f-1$ ve (3.56) eşitliğinden bulunacak a_0 yanılma olasılığı ile hesaplanacak $t_{(f-1,1-a/2)}$ sınır değerinden büyükse

$$t_{max} > t_{(f-1,1-a/2)} \quad (3.60)$$

İlgili ölçü uyşumsuzdur. Bu ölçü çıkarılır ya da tekrarlanır. Dengeleme işlemine diğer testlerde olduğu gibi uyşumsuz ölçü kalmayıncaya kadar devam edilir.

τ -dağılımı ile t - ve F -dağılımları arasında

$$\tau = \frac{\sqrt{f} t_{f-1}}{\sqrt{f-1+t_{f-1}^2}} \quad (3.61)$$

$$t_{(f-1,1-a_0/2)}^2 = F_{(1,f-1,1-a_0)} \quad (3.62)$$

Bağıntıları geçerlidir. Bu bağıntılarda τ -dağılımının sınır değerleri t - ya da F -dağılımlarının sınır değerleri ile hesaplanabilmektedir (Ünver 1994, Uysal 2012).

3.4.3.4 Robust (Sağlam) Kestirim Yöntemi

En küçük kareler (EKK) kestirimi kaba hatalara karşı hassastır. Bu metot kaba hatalar çıkarıldıktan sonra uygun çözüm verir. Kaba hatalara karşı hassas olmayan kestirim metottu robust kestirimdir. Robust kestirim, ölçülerin dağılım fonksiyonlarındaki küçük değişimlerden ve kaba hatalardan etkilenmeyen bir kestirim metottur.

EKK –kestiriminde v_i düzeltmelerinin kareleri toplam min. yapılmakta, Robust kestiriminde seçilen bir gaye fonksiyonu $p_{(v_1)} = \min.$ yapılmaktadır. Amaç fonksiyonun seçimine ilişkili olarak çok sayıda Robust kestirim metottu geliştirilmiştir.

Robust kestiriminde ölçülere uygun ağırlıklar saptanmakta ve ölçü çıkarılmaksızın

bilinmeyenler hesaplanmaktadır. Bu metotta birden çok kaba hata sorun oluşturmamakta ve kaba hataların tümü diğerlerine göre küçük ağırlıklar verilerek belirlenmektedir. Robust kestiriminde uygun ağırlık fonksiyonunun seçimi önemlidir.

Bu yöntemin ilkesi ana hatlarıyla aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$p_{(v_i)}$: Amaç fonksiyonu,

$\Psi_{(v_i)}$: Kestirim fonksiyonu,

$W_{(v_i)}$: Ağırlık fonksiyonu,

Olmak üzere amaç fonksiyonu min. yapılarak bilinmeyenler kestirilebilir. EKK-kestirimin de amaç fonksiyonu

$$p_{(v)} = \sum P v^2 = \min. \quad \sum_{i=1}^n P_i v_i^2 = \min. \quad (3.63)$$

Biçimindedir. Burada P, ağırlıkları, v , düzeltmeleri göstermektedir. Bu kestirim v düzeltmelerine karşı son derece hassastır. Öyleyse v 'ler daha az duyarlı olan $p_{(v)}$ fonksiyonları min. yapılarak, kestirim değerleri ‘‘Robust’’ laştırılabilir.

Robust kestiriminin genel amaç fonksiyonu

$$\sum_{i=1}^n P_i p_{(v_i)} = \min. \quad (3.64)$$

dur. EKK-kestirimi, $\Omega_1 = v_1^T P_{11} v_1$ nin özel bir durumudur. Burada kestirim fonksiyonu

$$\psi_{(v_i)} = \frac{\partial p}{\partial v_i} = p'_{(v_i)} \quad (3.65)$$

biçiminde ve ağırlık fonksiyonu

$$W_{(v_i)} = \frac{\psi(v_i)}{v_i} = W_i \quad (3.66)$$

biçiminde hesaplanır. Buradan

$$\sum_{i=1}^n P_i W_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3.67)$$

olur. Bu şekilde $x_j = (j = 1, 2, \dots, u)$ bilinmeyenleri göstermektedir. $\sum_{i=1}^n P_i W_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0$ eşitliğindeki $P_i W_i$ yerine

$$W_i = 1,$$

$$\bar{P}_i^{(1)} = P_i$$

alınabilir. Sonraki adımlarda örneğin k. Adımda

$$\bar{P}_i^{(k)} = P_i W_i^{(k-1)}$$

ile bulunabilir.

Amaç fonksiyonu $p(v) = |v|^p$ biçiminde genel bir fonksiyon olarak gösterilebilir. $P = 2$ alınırsa EKK-kestirimi elde edilir. $P=1$ alınırsa düzeltmelerin toplamının minimum olması istenir. Uygulamada çok çeşitli gaye, kestirim ve ağırlık fonksiyonları kullanılmaktadır.

Aşağıdaki tabloda çeşitli amaç fonksiyonları, kestirim fonksiyonları ve ağırlık fonksiyonları özetlenmiştir. Tablonun en alt sırasında verilen D simgesi ile gösterilen Danimarka yöntemi ismi ile tanımlanan yöntemin fonksiyonu devamlı değildir. Yayınlarda bu yaklaşımın Robust tanımına uygun düşmediği özellikle belirtilmektedir.

Uygulamada oldukça başarı ile uygulanan söz konusu yöntem, bu nedenle Robust kestirim tanımlaması yerine daha çok İteratif Yöntem adı ile anılmaktadır.

	Sınır	Amaç fonksiyonu $\rho(\vartheta)$	Kestirim fonksiyonu $\psi(\vartheta)=\rho'(\vartheta)$	Ağırlık fonksiyonu $W(\vartheta)=\frac{\psi(\vartheta)}{ \vartheta }$
K (EKK)		$\frac{1}{2}\vartheta^2$	ϑ	1
T (EKT)		$ \vartheta $	1	$\frac{1}{ \vartheta }$
P		$ \vartheta ^{1.2}$	$1.2 \vartheta ^{0.2}$	$1.2 \vartheta ^{-0.8}$
F (Fair)		$c^2(\frac{ \vartheta }{c} - \ln(1+\frac{ \vartheta }{c}))$	$ \vartheta (1+\frac{ \vartheta }{c})^{-1}$	$(1+\frac{ \vartheta }{c})^{-1}$
A Andrew	$ \vartheta \leq c\pi$ $ \vartheta > c\pi$	$c^2(1 - \cos\frac{ \vartheta }{c})$ $2c^2$	$c\sin\frac{ \vartheta }{c}$ 0	$(\frac{ \vartheta }{c})^{-1}\sin\frac{ \vartheta }{c}$ 0
B Beaton Tukey	$ \vartheta \leq c$ $ \vartheta > c$	$\frac{c^2}{6}(1 - (1 - (\frac{\vartheta}{c})^2)^3)$ $\frac{1}{6}c^2$	$ \vartheta (1 - (\frac{\vartheta}{c})^2)^2$ 0	$(1 - (\frac{\vartheta}{c})^2)^2$ 0
H Huber	$ \vartheta \leq c$ $ \vartheta > c$	$\frac{1}{2}\vartheta^2$ $c \vartheta - \frac{1}{2}c^2$	ϑ c	1 $c \vartheta ^{-1}$
D Danimarka	$ \vartheta \leq c$ $ \vartheta > c$	$\frac{1}{2}\vartheta^2$ $-(c^2 + c \vartheta)e^{- \vartheta /c}$	ϑ $ \vartheta e^{- \vartheta /c}$	1 $e^{- \vartheta /c}$

Şekil 3.6 Robust kestirim fonksiyonları (Ünver 1994)

Robust kestirim fonksiyonlarında geçen c parametresi, gözlem hatalarının belirli bir olasılıkla $\pm c$ sınırları içinde dağılmış olacağı varsayımına ilişkili olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle $c = K\sigma$ olarak düşünülebilir. K;1.5,2 gibi herhangi bir katsayı olabilir. σ , ölçü kümesini temsil eden öncül bir değerdir.

Özet olarak EKK-kestiriminden sonra çeşitli testlerle bulunan kaba hatalı ölçülerden biri çıkarılarak hesaplama tekrarlanır. Daha sonraki işlemlerde bu ölçülerin kullanıp kullanılmayacağı ile ilgili uygun yöntemlerin belirlenmesi konusu halen araştırılmaktadır. Robust kestiriminde böyle bir sorun yoktur. Kaba hatalı ölçülere diğerlerine göre çok küçük ağırlık verilerek hesap yapılır (Ünver 1994).

3.4.3.5 Test Yöntemlerinin Karşılaştırması

Biçim hatalarını oluşturan, normal dağılıma uymayan uyşumsuz ölçüler, yukarıda açıklanan test yöntemleri ile çıkarılmaktadır. Data-Snooping, t-Testi ve Tau-Testi ana hat olarak aynıdır. Yalnızca çeşitli dağılımlardaki test büyüklükleri kullanılmaktadır.

Test yöntemlerinden herhangi biri ile bir anda birden çok uyşumsuz ölçü saptanması hususunda, uyşumsuz ölçülerin tümü çıkarılmalı, içlerinden en büyük test büyüklüğüne sahip olan ilk önce çıkmalı ve dengeleme tekrarlanarak test tekrarlanmalıdır. Çünkü en büyük test büyüklüğüne sahip ölçü, diğer ölçülere tesir etmiş olabilir.

Çok büyük serbestlik derecelerinde testler hassaslaşmaktadır. Bu nedenle dengeleme sorunu parçalara bölünerek uyşumsuz ölçülerin çıkarılması metoduna gidilir. Küçük serbestlik derecelerinde de ($f < 10$), τ ve t testleri etkisiz kalmaktadır.

Aynı yanılma olasılığı $0 < \alpha$ için t-testi veya Tau-testinden bir âdetine uygulamak yeterli olmaktadır.

Robust kestirim yönteminde her tekrarlama ölçüler için uygun ağırlıklar saptanmakta rastgele bir ölçünün ölçü kümesinden atılması söz konusu olmamaktadır. Bu niteliği Robust kestirimin uyşumsuz ölçülerin çıkarılmasında, diğer metotlara göre avantajına olarak saptanmalıdır (Ünver 1994, Uysal 2012).

Birden fazla örnek kümeye dayanan uygulama sonuçlarına göre nivelman ağılarında en başarılı yöntemler, Danimarka, Hampel ve L1-norm yöntemleri şeklinde sıraya koyulabilir. Gerçekleştirilen uygulamalara göre, jeodezik ağılarda uyşumsuz ölçülerin saptanmasında Robust yöntemler kullanılmalıdır. Bununla beraber, örnek kümede uyşumsuz ölçü olmamasına karşın Robust kestiricilerin bazı durumlarda iyi bir ölçüyü uyşumsuzmuş gibi belirleyebildiğine de dikkat edilmelidir (Hekimoğlu ve Erenoğlu 2007, Uysal 2012).

3.4.4 Nivelman Ağlarında Duyarlılık ve Güven Ölçütleri

Çeşitli sebeplerle oluşturulan nivelman ağlarının gayeleri için yeterli olup olmadıklarının kontrol edilmesi duyarlılık ölçütleri ile yapılmaktadır. Duyarlılık ölçütleri, kullanılan bir dengeleme modeli ile gerçekleştirilen hesaplama neticesinde elde edilen büyüklüklerdir. Dengeleme modelinin aranan şartları sağlayıp sağlamadığı ya da ölçülerin incelenmesi kısmında biçim hataları oluşup oluşmadığını da güven ölçütleri ile kontrol edilir (Yalçinkaya 1996).

3.4.4.1 Nivelman Ağlarında Duyarlılık Ölçütleri

Duyarlılık ölçütleri ağın niteliğini gösteren ölçütlerdir. Bu ölçütler, dengeleme modeli geçerli olduğu durumlarda gerçeğe en yakın bilgiyi verirler. Dengelemenin matematiksel modeli, ölçüler ile bilinmeyenler arasındaki geometrik ve fiziksel ilişkileri kapsayan fonksiyonel model ile ölçülerin hassasiyetlerini, aralarındaki korelasyonları yansıtan stokastik modelden oluşmaktadır.

Nivelman ağları için matematik model aşağıdaki gibi kurulur.

H_i, H_j : i ve j noktalarının yükseklikleri,

Δh_{ij} : i ve j noktaları arasında ölçülen yükseklik farkı ve

v_{ij} : ölçüye eklenecek düzeltme

olmak üzere ölçü denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Delta h_{ij} + v_{ij} = H_j - H_i \quad (3.68)$$

Dengelemenin fonksiyonel modeli ve stokastik modeli aşağıdaki biçiminde oluşturulur.

$$l + v = Ax \quad (3.69)$$

$$K_{ll} = s_o^2 Q_{ll} \quad (3.70)$$

Burada A, katsayılar matrisini, l ölçüleri ve x , bilinmeyenleri, K_{ll} , ölçülerin varyans-kovaryans

Matrisini, s_o^2 birim ölçünün öncül varyansı ve Q_{ll} , ölçülerin ters ağırlık matrisini göstermektedir.

Bu model en küçük kareler ilkesine göre $v^T P v = \min.$ koşulunu sağlayacak şekilde çözülerek aşağıdaki eşitlikler bulunur.

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad \text{Dengeleme bilinmeyenleri} \quad (3.71)$$

$$Q_{xx} = (A^T P A)^{-1} \quad \text{Bilinmeyenler ters ağırlık matrisi} \quad (3.72)$$

$$Q_{vv} = P^{-1} - A Q_{xx} A^T \quad \text{Düzeltilmelerin ters ağırlık matrisi} \quad (3.73)$$

$$v = -Q_{vv} P l \quad \text{Düzeltilmeler} \quad (3.74)$$

$$m_0^2 = \frac{v^T P v}{n-u} \quad \text{Birim ölçünün varyansı} \quad (3.75)$$

Burada,

$P_i = 1/s_i$: ölçülerin ağırlıkları,

s_i : nivelman geçkisinin uzunluğu,

n : ölçü sayısı

u : bilinmeyen sayısı (Yalçinkaya 1996, Uysal 2012)

Model Hipotezinin Testi: Birim ölçünün ortalama hatası s_o , bu büyüklüğün dengelemeden sonra elde edilen soncul değeri m_o ile gösterilirse;

$$H_o = E\{s_o^2\} = E\{m_o^2\} = \sigma_o^2 \quad (3.76)$$

biçiminde kurulur.

Gerek öncül değer s_o ve gerekse soncul değer m_o aynı bir kurumsal standart sapma σ_o 'ın Uygulamada elde değerleri olduklarından, umut değeri koruyan büyüklüklerdir (Öztürk ve Şerbetçi 2005, Turan 2007)

Test büyüklüğü T hesaplanır.

$$T = \frac{m_o^2}{s_o^2} \quad (3.77)$$

$T < F_{(f, f_o, 1-a/2)}$ ise dengeleme modeli geçersizdir. Kaba hatalı ölçü ya da ölçüler bulunabilir.

Ağırlıkların doğru kestirim edilip edilmedikleri denetlenmelidir. Aletlerin ayar hataları kontrol edilmelidir. Fonksiyonel modelin yeterliliği incelenmelidir (Turan 2007).

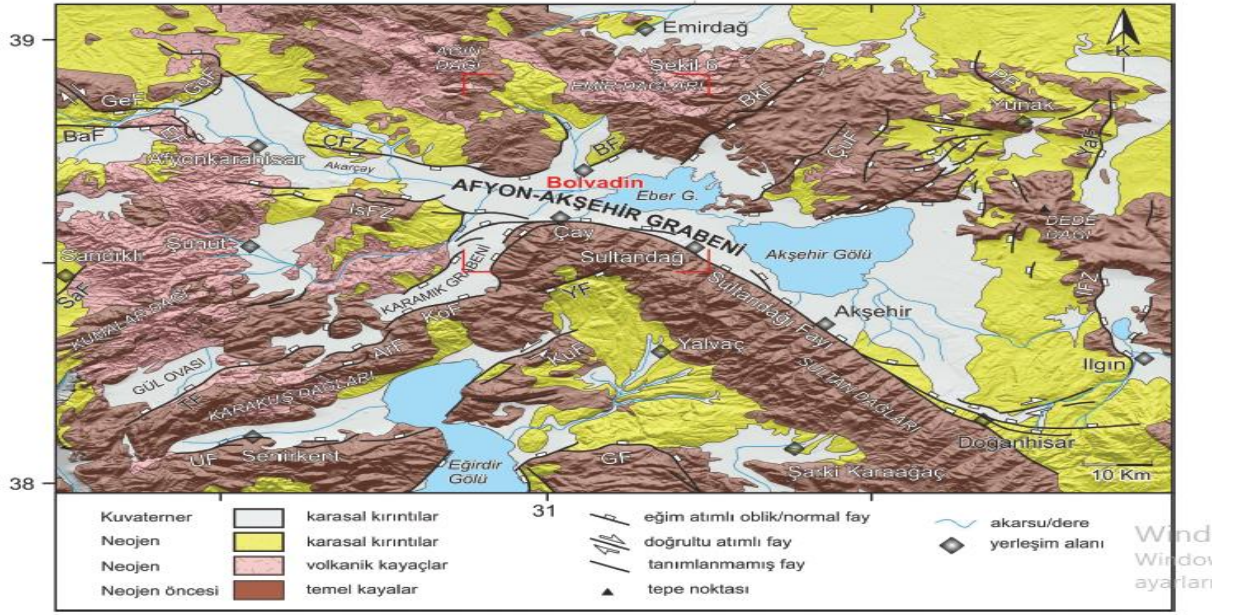
4.UYGULAMA

Asismik yüzey deformasyonlarının hassas nivelman tekniği ile izlenmesi uzun zamanlı ölçümler ile takip edilmesi gereken bir incelemedir. Uzun zamanlı ölçümler esnasında hassas ve çok dikkatli çalışılmalıdır. Bu derecede zahmetli bir inceleme yöntemi, arazi koşulları da göz önüne alındığında birçok insan için zorlayıcıdır (Sylvester 1984,1986, 1995, Yalçın 2019).

Düşey deformasyonu tespit etmek için Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avrupa'da hassas nivelman teknikleri kullanılsa da; ülkemizde bugüne kadar çok az dikkat gösterildi. Bunun nedenlerinden biri hassas nivelman tekniğinin getirdiği zorluktur; gerek insan gücüne dayalı olması, maliyetli olması, özel ekipmanların kullanılması vb. zorluklardır (Yalçın 2019).

Afyon-Akşehir Grabeninin ortasında yer alan Bolvadin yerleşim merkezinin güney kısmı ile kuzey doğu bölümü arasında kalan bölge içerisinde, Bolvadin Fayına paralel/yarı paralel gidişli daha önceden görülmeyen yüzey deformasyonları meydana gelmiş ve meydana gelmeye devam ettiği gözlenmiştir. Bolvadin merkezinde büyük bir kısmı yerleşim alanlarından bir hat boyunca geçen yüzey deformasyonları nedeniyle, bahçe duvarlarında kırılmalar, binalarda çatlaklar ve yarıklar, yollarda çökmeler, yer altı kanalizasyon ve su hatlarında kırılmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Çizgisel gidişli yarık ve çatlaklar biçiminde gözlenen yüzey deformasyonları boyunca güneydoğuda kalan bloğun düştüğü ve göreceli olarak kuzeybatıdaki bloğun yükseldiği gözlemlenmiştir (Yalçın 2019).

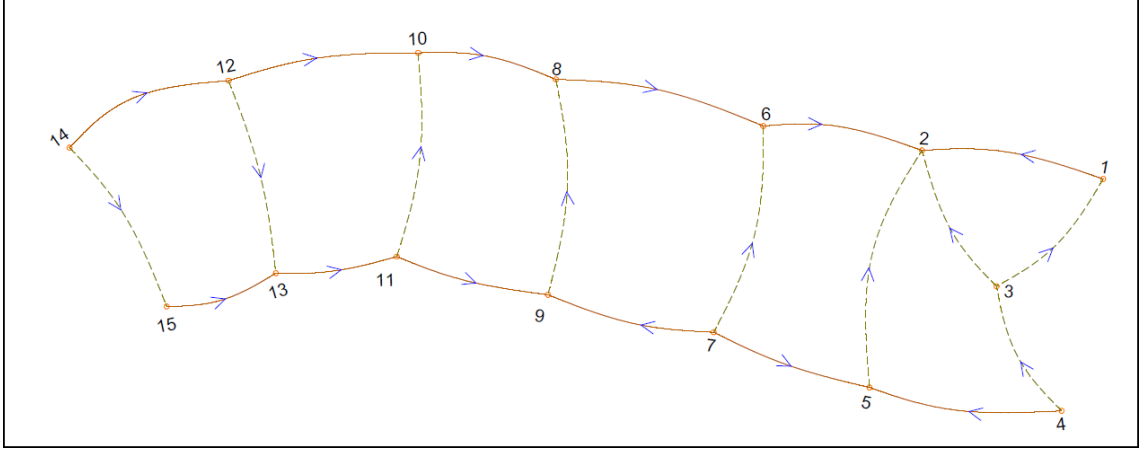
Bolvadin ilçesi Bakanlar kurulunun 22.01.2018 gün ve 2018/11275 sayılı kararı ile kabul edilen Türkiye Deprem Bölgesi haritasına göre Yüksek Tehlikeli Deprem alanında yer almaktadır.



Şekil 4.1 Afyon-Akşehir Grabeni ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Özkaymak vd. 2017, Emre vd. 2011 ve Turan, 2002'den düzenlenmiştir). Kısaltmalar: BaF: Balmahmut Fayı; GgF: Gazlıgöl Fayı; EF: Erkmen Fayı; ÇFZ: Çobanlar Fay Zonu; IsFZ: Işıklar Fay Zonu; BF: Bolvadin Fayı; BkF: Büyük Karabağ Fayı; ÇuF: Çukurcak Fayı; PF: Piribeyli Fayı; YaF: Yavaşlı Fayı; IFZ: Ilgın Fay Zonu; YF: Yarıkkaya Fayı; KuF: Kumdanlı Fayı; GeF: Gecek Fayı, GF: Gelendost Fayı; KoF: Koçbeyli Fayı; ArF: Arızlı Fayı; UF: Uluborlu Fayı; TF: Tatarlı Fayı; SaF: Sandıklı Fayı.

4.1 Jeodezik Ağın Kurulması

Bolvadin ilçe merkezindeki asismik yüzey deformasyonlarının incelenmesi ve takibi için yüzey deformasyonlarının geçtiği bölgelere 2016 yılında nivelman hatlarının tesisi gerçekleştirilmiş. KD-GB uzanımlı yüzey deformasyonlarının kuzeybatısı ve güneydoğusunda meydana gelen düşey yönlü hareketi izlemek için; nivelman hatları yüzey deformasyonlarını dik kesecek şekilde tesis edilmiştir. RS noktaları elektrik direklerine tesis edilmiştir. Bu kapsamda toplam 8 profil 81 RS noktasının tesisi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2-4.3).



Şekil 4.2 Bolvadin'deki jeodezik ağ ve ana ağ noktaları.

Çizelge 4.1 Profillerdeki noktalar ve numaraları.

Profil Numarası	Profil Üzerindeki Nokta Numaraları
Profil 1	1-101-102-103-104-105-106-107-3
Profil 2	2-201-202-203-204-205-206-207-3-301-302-303-304-305-4
Profil 3	2-401-402-403-404-405-406-407-408-409-410-411-412-413-414-5
Profil 4	6-501-502-503-504-505-506-507-508-509-510-511-512-513-514-515-7
Profil 5	8-601-602-603-604-605-9
Profil 6	10-701-702-703-11
Profil 7	12-801-802-803-804-13
Profil 8	14-901-902-903-904-15



Şekil 4.3 A ile gösterilen fotoğraf tesis edilen RS aparatları, B ile gösterilen fotoğraf RS noktalarının tesis edildiği elektrik direklerini gösterilmektedir.

2016 yılında kurulan bu jeodezik ağ 2020 yılına kadar herhangi bir fiziksel anlamda tahribata uğramamıştır. Bunun en büyük sebebi yurt dışından özel olarak getirilen RS noktalarıdır. Bu RS'lerin ölçüm esnasında takılıp, ölçüm bittikten sonra çıkarılması tahribatın önüne geçmiştir (Şekil 4.3).

4.2 Nivelman Ölçümleri

2016 yılında kurulan nivelman ağının ölçümlerini hassas nivelman tekniği ile yapılmıştır. 2016-2017 yıllarındaki çalışmalar Yalçın, 2018 yılındaki çalışmalar Bozkuş tarafından, 2019-2020 yıllarındaki çalışmalar ise bu tez çalışması kapsamında yapılmıştır (Çizelge 4.2). Hassas nivelman tekniğiyle yapılan ölçümlerde 2 miracı, 2 alet operatörü, 2 yazıcı olmak üzere 6 kişi görev almıştır. Ölçüm ekipmanları olarak;

- 2 adet sayısal nivo (TOPCON DL-101C)
- 2 adet barkodlu invar mira kullanılmıştır.

Her kampanya öncesi aletlerin kalibrasyonları ilgili firmanın seviyesi tarafından yapılmıştır.

Çizelge 4.2 Kampanya ölçümlerinin tarihlerini ve kimin tarafından yapıldığını gösteren çizelge.

Kampanya Numarası	Kampanya Tarihi	Kampanya Arası Zaman Farkı	Jeodezik Ağda Çalışmalar
1.Kampanya	16.08.2016	-	Mustafa YALÇIN
2.Kampanya	08.08.2017	12 Ay	Mustafa YALÇIN
3.Kampanya	04.08.2018	24 Ay	Hasan Basri BOZKUŞ
4.Kampanya	12.07.2019	35 Ay	Kaan ÇALIŞKAN
5.Kampanya	22.08.2020	47 Ay	Kaan ÇALIŞKAN

2016-2020 yılları arasında bölgedeki düşey deformasyonun hızlarını belirlemek için 5 yıl boyunca hassas nivelman ölçüleri yapılmıştır (Çizelge 4.2). Hassas nivelman ölçülerini yaparken G1-İ1-İ2-G2 (Geri1-İleri1-İleri2-Geri1) tekniği kullanılmıştır. Elektrik direklerine tesis edilen RS noktaları arasındaki mesafe hassas nivelman yönteminin koşullarını sağlayacak şekilde en fazla 30 metre olarak alınmıştır. Ölçüler esnasında gözlem çizgileri yerden en az 70 cm üzerinde olacak şekilde nivolar kurulmuştur. Ölçülerin tamamı gidiş-dönüş olarak yapılarak, tesis edilen güzergâhların başlangıç ve bitiş noktaları nivelman ölçümleriyle birbirleri ile bağlanmıştır.



Şekil 4.4 Nivelman güzergâhlarının Google earth uydu görüntüsü üzerindeki lokasyonları; kırmızı hatlar yüzey deformasyonlarını, yeşil hatlar nivelman güzergâhlarını, sarı ve mavi hatlar bağlantı nivelmanını göstermektedir (Bozkuş 2019).

Güzergâh ölçümleri yapılırken G1-İ1-İ2-G2 her bir okumada 3 tekrar yapıp ortalaması alınmıştır. Aynı Geri ve İleri okumalar arasındaki fark 0.3 cm büyük çıkması durumunda ölçümler tekrarlanmıştır. Güzergâh başlangıçları ve bitiş noktaları birleştirilirken G-İ (Geri-İleri) tekniğiyle yapılmıştır. Her okuma 3 tekrarlı olacak şekilde ölçülmüştür. Güzergâh bitiş ve başlangıç noktalarını birleştirirken yapılan ölçümlerde mira payandası ve mira altlığı kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Arazi ölçümlerini gösteren fotoğraflar (2020).

GÜZERGAH ADI: 1(DÖNÜŞ) MAVİ				ÖLÇÜ YERİ: BOLVADİN		
				ÖLÇME TARİHİ: 22.08.2020		
NOKTA NO	ARA UZAKLIK		MİRA OKUMALARI		GERİ-İLERİ FARKLAR	ORTALAMA GERİ-İLERİ
			GERİ 1	İLERİ 1		
			GERİ 2	İLERİ 2		
1-1	22.105		0.86902			
			0.86908			
1-2	29.665	15.276	0.50754	0.87207	-0.00305	-0.003030
			0.50769	0.87209	-0.00301	
1-3	31.174	17.745	0.64608	0.97046	-0.46292	-0.462835
			0.64609	0.97044	-0.46275	
1-4	15.211	41.904	0.64335	0.69304	-0.04696	-0.046955
			0.64312	0.69304	-0.04695	
1-5	27.182	13.157	0.39306	1.42882	-0.78547	-0.785575
			0.39312	1.42880	-0.78568	
1-6	25.810	11.746	0.50486	1.04393	-0.65087	-0.650865
			0.50503	1.04398	-0.65086	
1-7	24.435	24.016	0.83599	1.32261	-0.81775	-0.817725
			0.83590	1.32273	-0.81770	
1-8	24.899	35.060	0.14565	0.53415	0.30184	0.301820
			0.14551	0.53410	0.30180	
1-9		13.302		1.16291	-1.01726	-1.017330
				1.16291	-1.01740	

Şekil 4.6 Örnek nivelman klişesi.

Ölçüler esnasında hassas nivelman tekniklerinin gerektirdiği ölçme tekniklerinin çoğu uygulanmıştır. Bu teknikler uygulanarak yüksek doğruluk elde edilmek istenmiştir.

- Mira ile nivo arasındaki mesafe eşit alınması için özen gösterilmiştir (maksimum 30 metre).
- Mira başlangıç hatasını ortadan kaldırmak için okumalara başlanan mira ile okumalar bitirilmiştir.
- Alet operatörlerinin göz hassasiyeti farklı olduğu için ölçüm yaptıkları nivoları bütün ölçümler bitine kadar aynı operatör tarafından kullanmıştır.
- Refraksiyon hatasını etkisini en aza indirebilmek için nivo mümkün mertebe yüksek kurularak yerden en az 70 cm yüksekte okumalar yapılmıştır.
- Katlanabilir mira yerine 2 m uzunluğundaki invar barkodlu mira kullanılmıştır.
- Nivolardan doğacak hataların önüne geçebilmek için (gölgelendirme hatası, Işık hatası vb.) nivoların kurulumu ve kurulacağı nokta dikkatle seçilmiştir.

Tüm güzergâhlarda gidiş-dönüş ölçüleri arasındaki farklar $4\sqrt{S}$ formülünden hesaplanan tecviz sınırını geçmemiştir (Çizelge 4.2). Ülkemizde Hassas nivelman teknikleri için tecviz sınır bağıntıları bulunmadığı için Alman standartlarında (DIN-18710) belirtilen tecviz sınırları ve kapanma hataları verilmiştir (Bozkuş 2019).

Çizelge 4.2 Güzergâh hata sınırları çizelgesi

Güzergâh Numarası	Güzergâh Mesafeleri	Gidiş-Dönüş Farkları(mm)					Hata Sınırı(mm)	Sonuç
		2016	2017	2018	2019	2020		
1	300	0.8	0.6	0.7	0.1	1	2.1	Uygun
2	800	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	3.6	Uygun
3	550	0.5	0.4	0.7	0.6	2.7	3.0	Uygun
4	250	0.5	0.6	0.9	0.5	1.2	2.0	Uygun
5	200	0.6	0.2	1.0	0.5	1.4	1.8	Uygun
6	150	0.5	1.0	0.1	0.7	0.3	1.5	Uygun
7	600	1.2	0.2	2.4	1	3.1	3.1	Uygun
9	250	1.1	1.1	0.1	1	0.9	2.0	Uygun

4.3 Hassas Nivelman Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Kampanya ölçüleri yıllara göre serbest ağ dengelemesi yapılarak her nokta için dengelenmiş yükseklikleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.3). Ağın serbest dengelemesi en küçük kareler yöntemine göre yapılmıştır. Serbest ağ dengelemesinden sonra uyuşumsuz ölçü testi Pope yöntemine göre yapılmıştır. Ölçülerin değerlendirilmesiyle birlikte uyuşumsuz ölçü olmadığı görülmüştür.

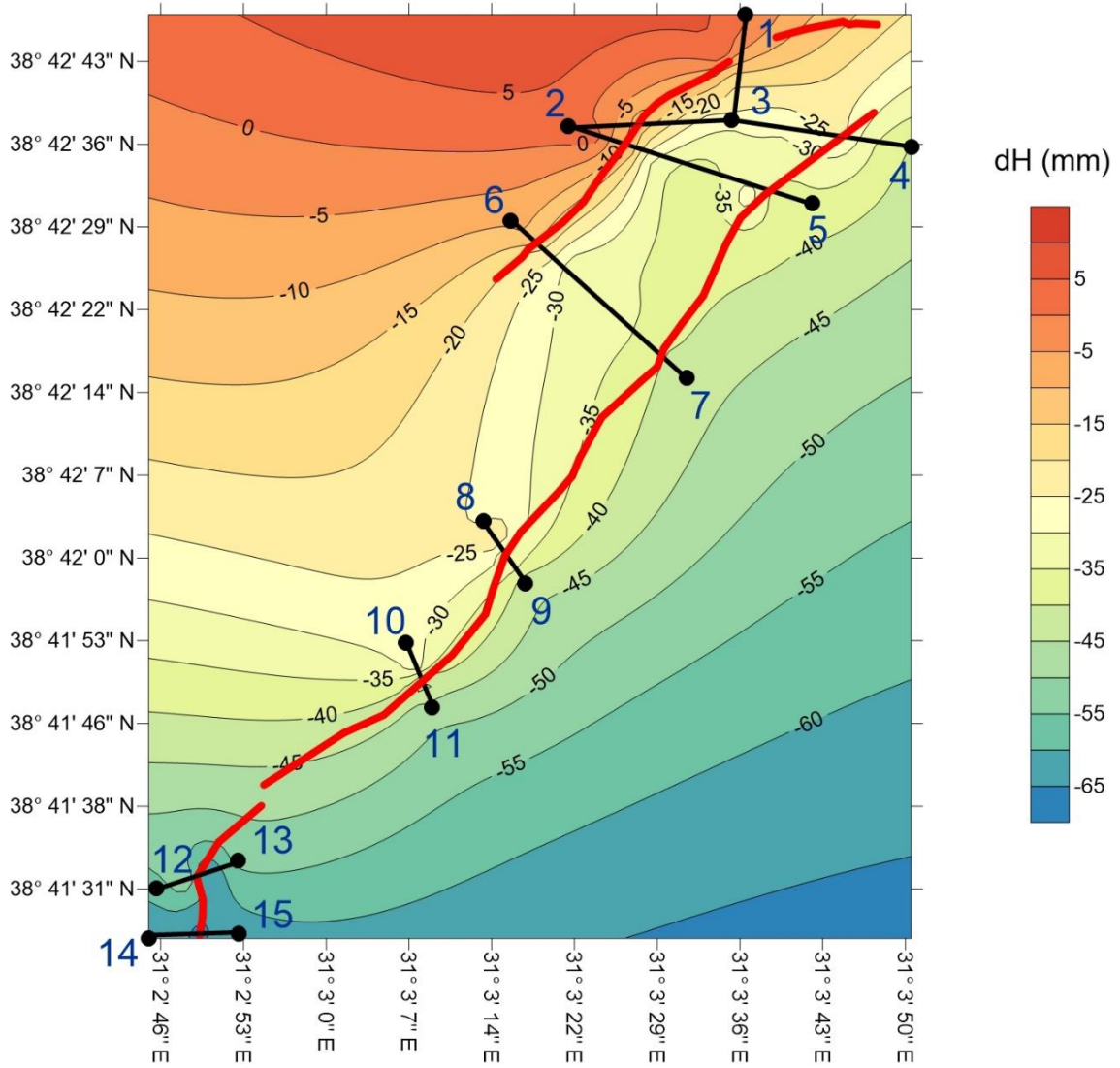
Serbest ağ dengelenmesi sonucu yıllara göre karesel ortalama hatalar Çizelge 4.3 de verilmiştir;

Çizelge 4.3 Serbest ağ dengelenmesi sonucu kampanyalara göre Karesel ortalama hataları

Kampanyalar	Karesel Ortalama Hatalar
2016	3.40 mm
2017	2.07 mm
2018	2.76 mm
2019	3.11 mm
2020	3.22 mm

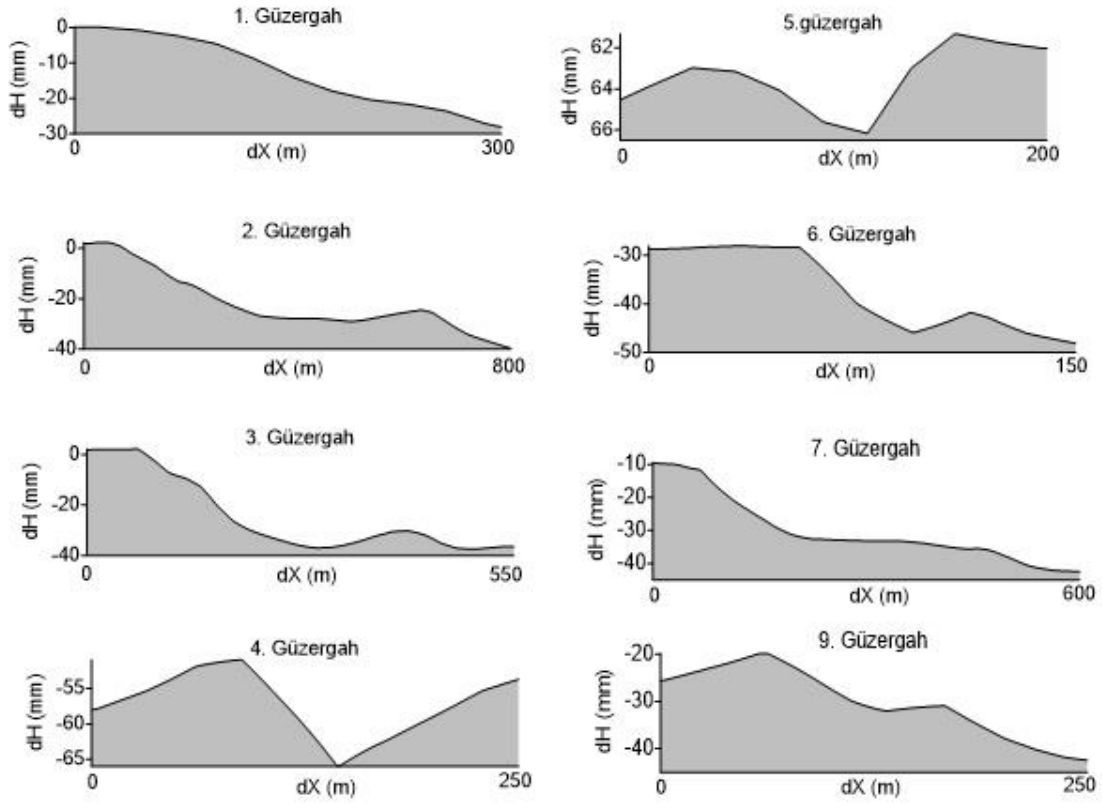
Daha önce aynı jeodezik ağda çalışmada bulunan ve 2016-2017 yıllarındaki ölçülerle; ana ağ noktalarında S-transformasyonu deformasyon analizi yapılmıştır. GLOBAL TEST sonucunda deformasyon olduğunu tespit edilmiştir. Yalçın 2019'daki sonuçlarına dayanılarak, öncelikle ağdaki deformasyonun devamlılığını tespit etmek ve yıllara göre düşey yönlü hızını bulmak için; her kampanyanın 1 noktasına dayalı olarak zorlamasız, en küçük kareler yöntemiyle dengelenmiştir. Jeodezik ağdaki herhangi bir noktanın değişim miktarı (Δh)'dır. (Δh); bir sonraki yılın dengelenmiş yüksekliklerinden, bir önceki yılın dengelenmiş yüksekliklerinin farkı alınmıştır. Örneğin; 2019 yılının dengelenmiş yükseklikleri (h_{2019}), 2020 yılının dengelenmiş yükseklikleri (h_{2020})'dir.

$$\Delta h = h_{2020} - h_{2019} \quad (4.1)$$



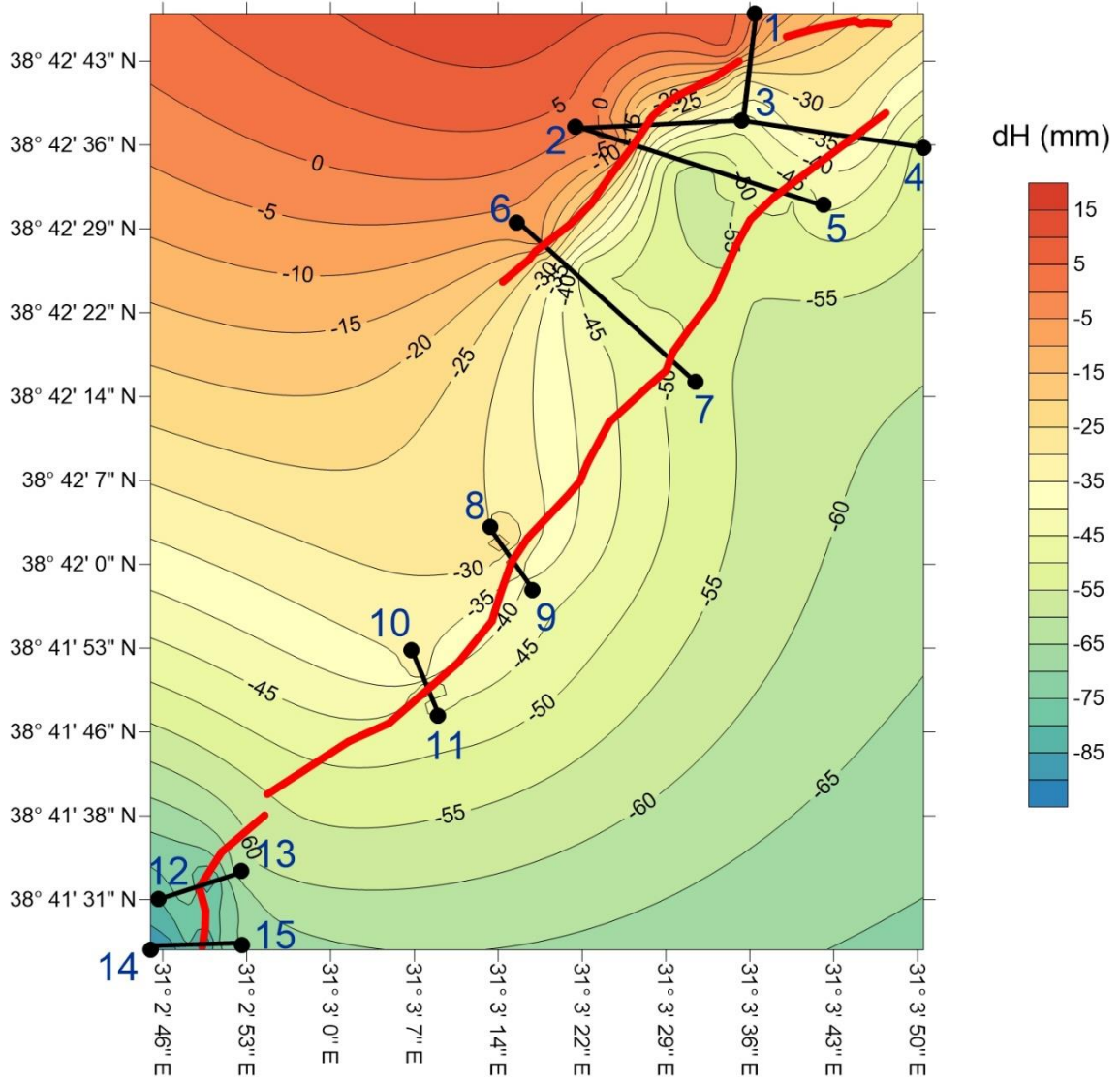
Şekil 4.7 2016-2017 deformasyon haritası, harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

2016-2017 yılları arasında jeodezik ağıda deformasyon gözlemlenmiş ve 2016-2017 ortalama deformasyon hızı 25-55 mm'dir. Şekil 4.7 incelediğinden yüzey deformasyonları boyunca; kuzeybatıdaki blok yükseldiği veya sabit kaldığı, güneydoğu yönündeki bloğun düşüşe geçtiği görülmüştür (Şekil 4.7).



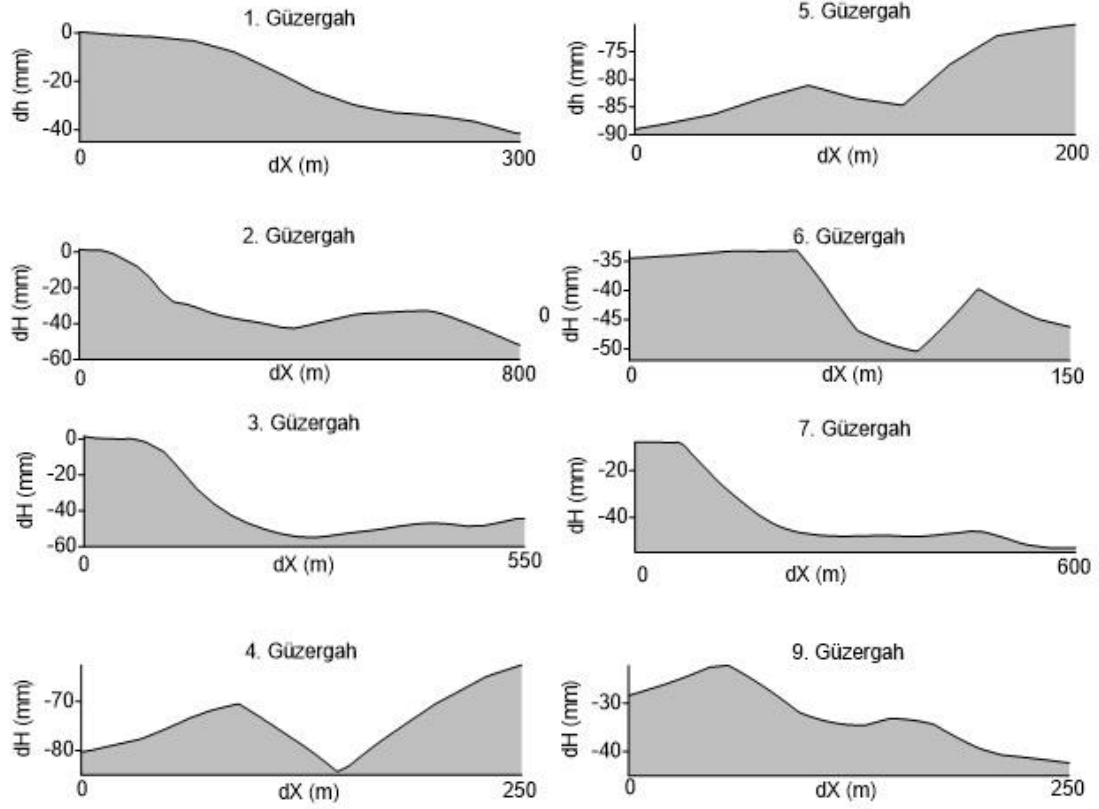
Şekil 4.8 Güzergâhların 2016-2017 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.

2016-2017 dengelenmiş yükseklikleri farklarına bakıldığında; güzergâhların hepsinde deformasyonlar gözlemlenmiştir. Kesitler incelendiğinde deformasyon trendi tüm güzergâhlarda aynı trendi göstermemektedir. 1-2-3-7'nolu güzergâhlardaki deformasyon trendinin direkt olarak çökme, 4-5-9'nolu güzergâhlarda deformasyon trendinin ilk önce yükseldiği sonra çöktüğü ve tekrar yükseldiği, 6'nolu güzergâhın sabit kalıp, çökme eğilimine geçtiği ve yükseldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.8).



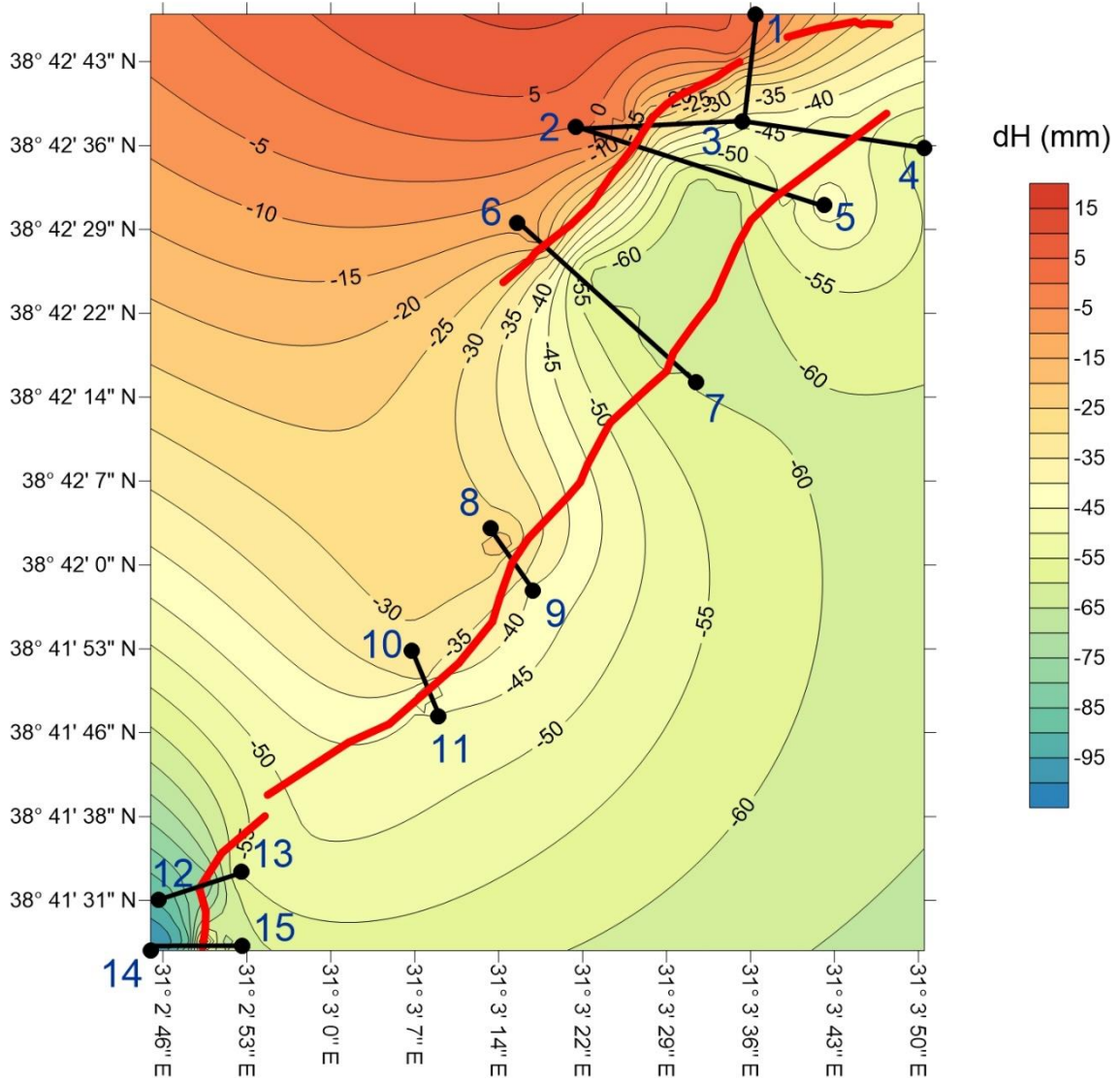
Şekil 4.8 2017-2018 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

2017-2018 yılları arasında jeodezik ağıdaki deformasyonun devam ettiği ve 2017-2018 ortalama deformasyon hızı 25-65 mm'dir. Bir önceki kampanyayla aynı trendi gösterip kuzeybatıdaki blok yükselirken veya sabit kalırken, güneydoğudaki blok düşüşe geçmektedir. Bir önceki yılda elde edilen veriler ile aynı olup; 4 (12-13) ve 5 (14-15)'nolu güzergâhlarda bu durum tam tersi olarak görülmektedir (Şekil 4.8).



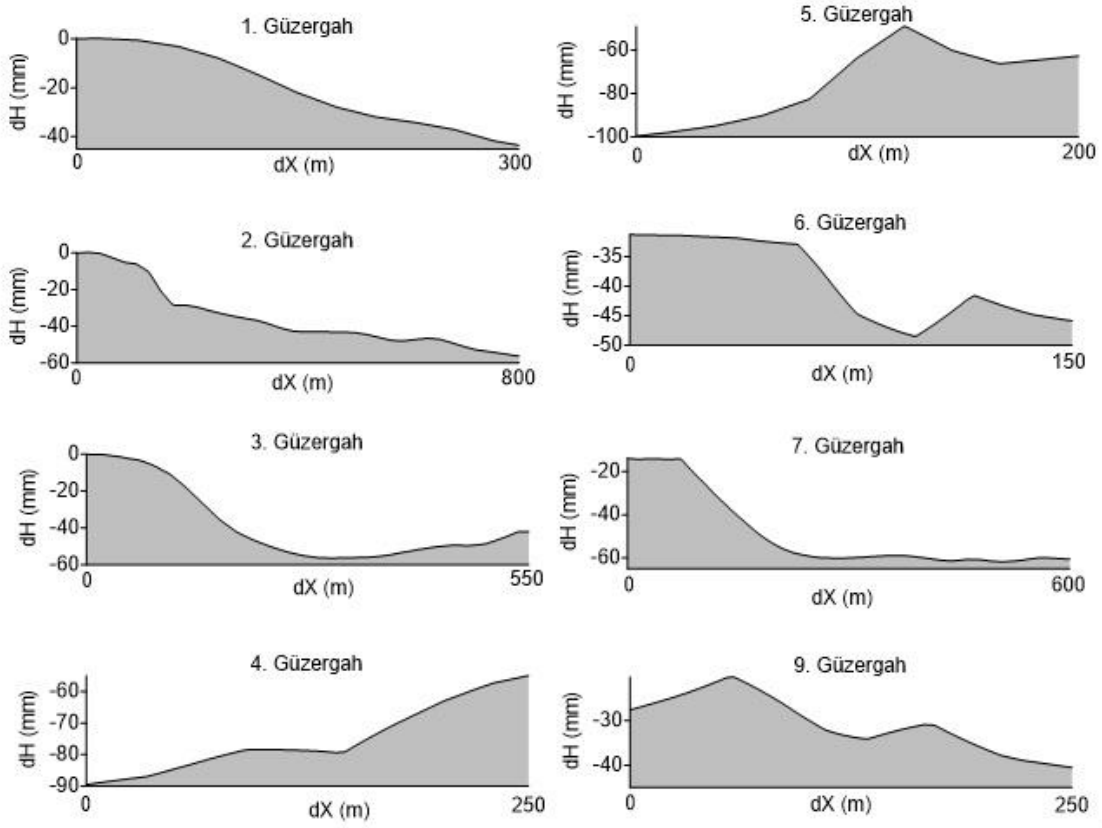
Şekil 4.9 Güzergâhların 2017-2018 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.

2017-2018 yılları arasındaki dengelenmiş yükseklik farkları bakıldığında; güzergâhların hepsinde deformasyon gözlemlenmiştir. Bir önceki 2016-2017 yılları arasındaki deformasyon kesitleriyle aynı trendi göstermektedir (Şekil 4.9).



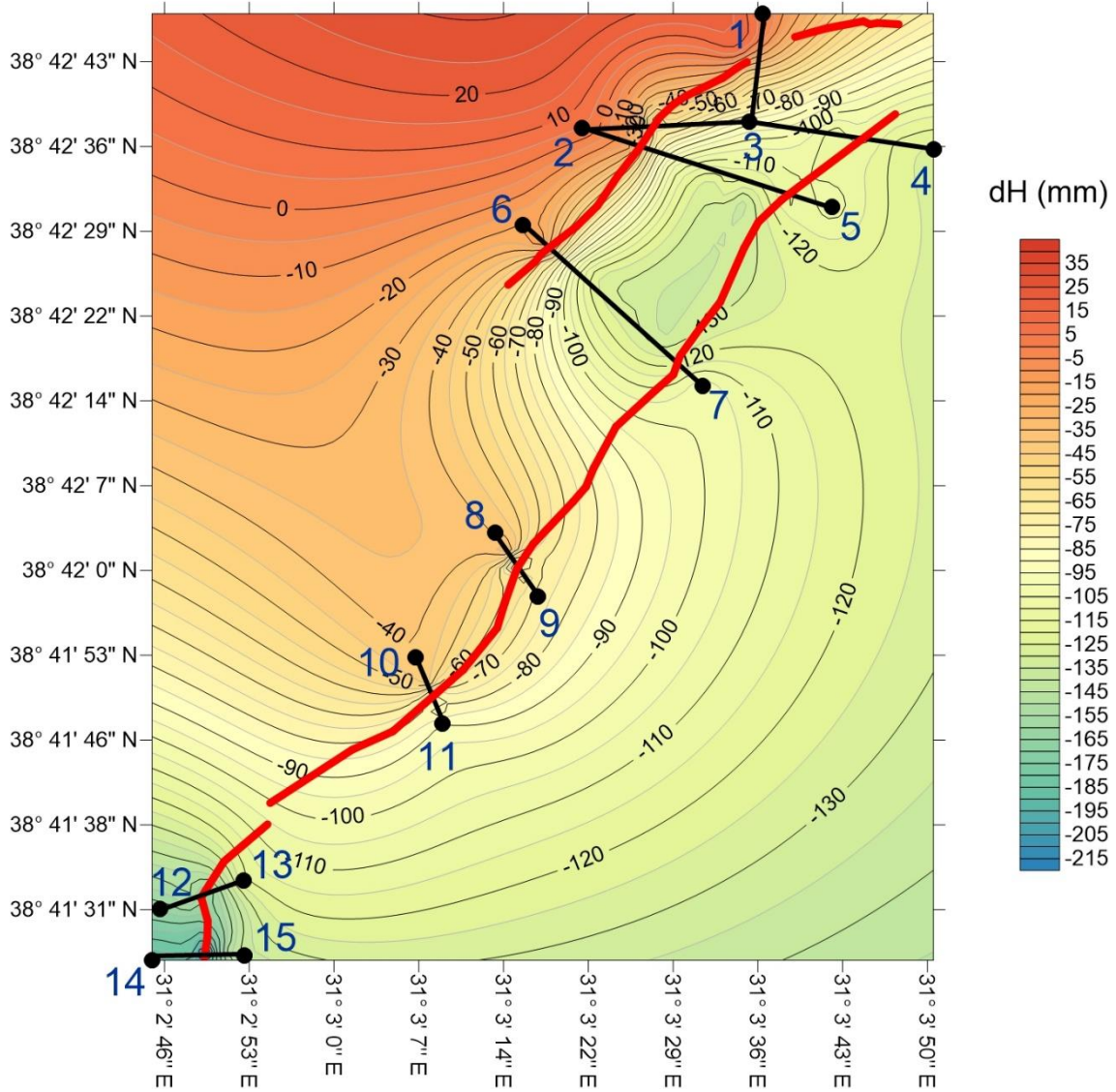
Şekil 4.10 2018-2019 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

2018-2019 yılları arasında jeodezik ağda deformasyonun devam ettiği ve 2018-2019 yılları arasındaki deformasyon hızı önceki yıllar arası deformasyon hızıyla benzerlik gösterdiği ve 25-65 mm'dir. Bir önceki kampanyalarla aynı trendi gösterip kuzeybatıdaki blok yükselirken veya sabit kalırken, güneydoğudaki blok düşüşe geçmektedir. Diğer yıllar da olduğu gibi; 4 (12-13) ve 5 (14-15) nolu güzergâhlarda bu durum tam tersi olarak görülmektedir (Şekil 4.10).



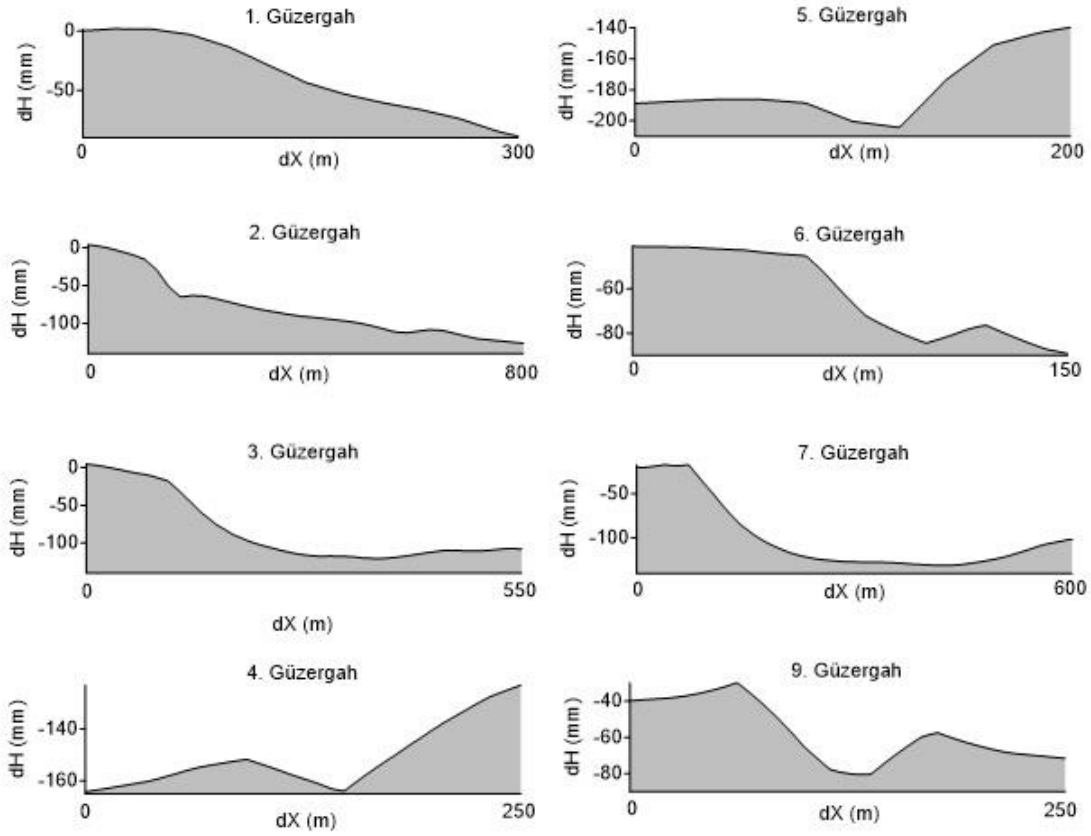
Şekil 4.11 Güzergâhların 2018-2019 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.

2018-2019 dengelenmiş yükseklikleri farklarına bakıldığında; güzergâhların hepsinde deformasyon gözlemlenmektedir. Kesitler incelendiğinde deformasyon trendi tüm güzergâhlarda aynı trendi göstermemektedir. 1-2-3-7'nolu güzergâhlardaki deformasyon trendinin, 9'nolu güzergâhın deformasyon trendinin, 6'nolu güzergâhın deformasyon trendinin diğer yıllarla aynı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 4-5'nolu güzergâhlar diğer yıllardaki trendden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yıllarda ilk önce yükselen daha sonra düşüşe geçen ve tekrar yükselen olarak görülen trend, direkt olarak düşüşten yükselen olarak gözlemlenmiştir (Şekil 4.11).



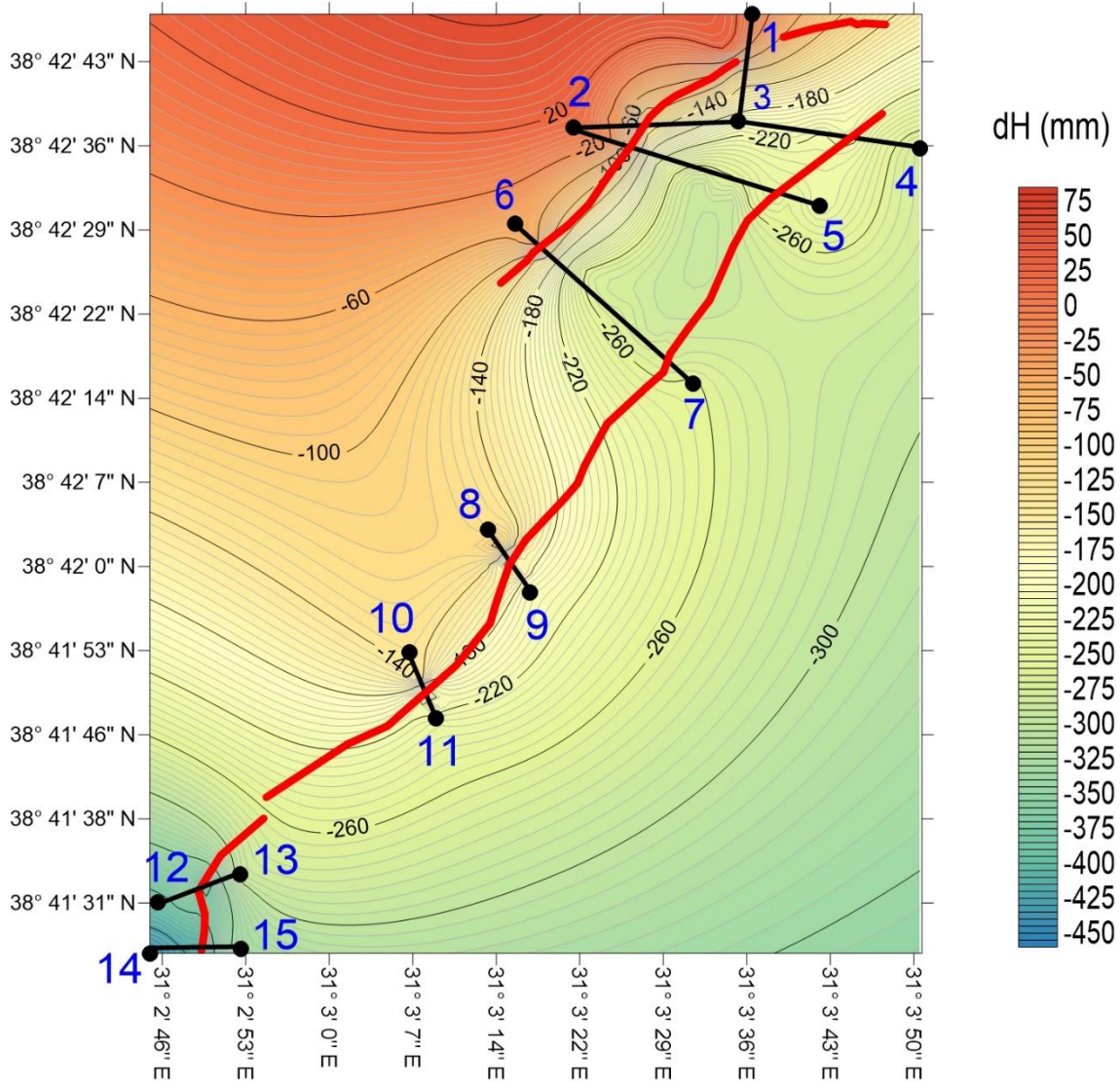
Şekil 4.12 2019-2020 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

2019-2020 yılları arasında jeodezik ağıda deformasyonun devam ettiği ve 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon hızı diğer yıllar arasındaki deformasyon hızıyla benzerlik göstermeyip, nerdeyse 2 katına çıkmıştır. 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon hızı 80-95 mm'dir. Bir önceki kampanyalarla aynı trendi gösterip kuzeydoğudaki blok yükselirken veya sabit kalırken, güneydoğudaki blok düşüşe geçmektedir. Diğer yıllar da olduğu gibi; 4 (12-13) ve 5 (14-15)'nolu güzergâhlarda bu durum tam tersi olarak görülmektedir (Şekil 4.12)



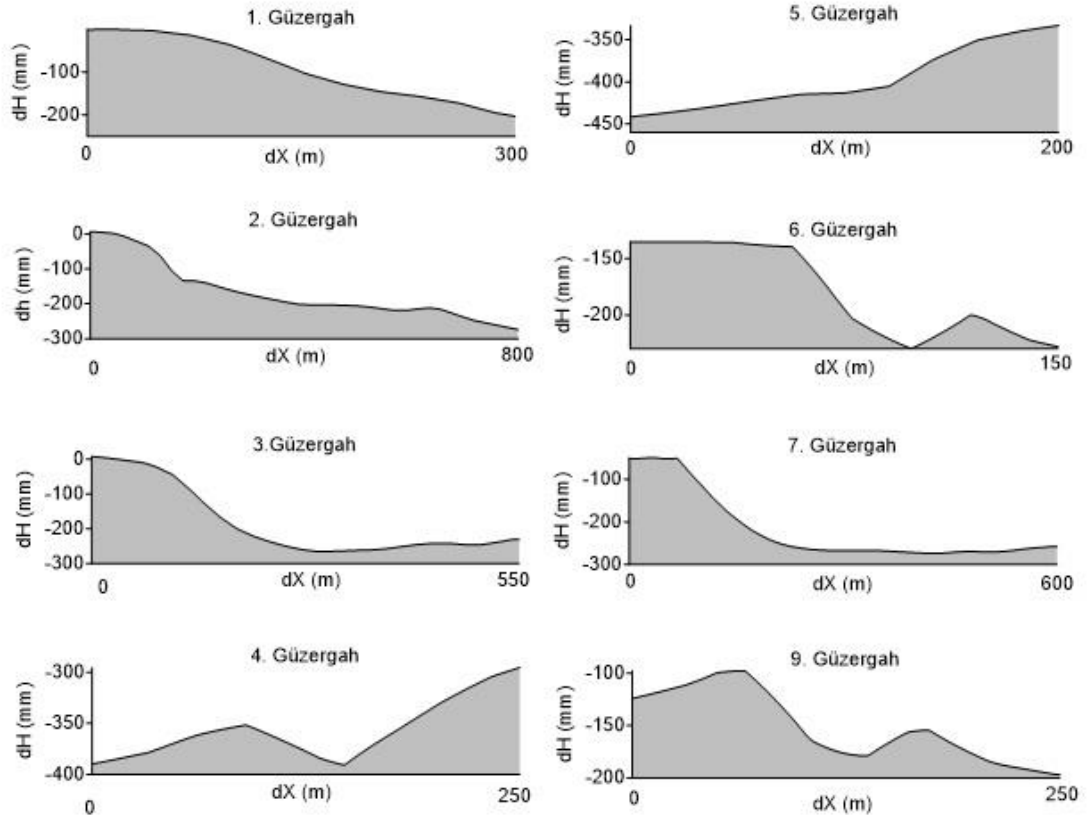
Şekil 4.13 Güzergâhların 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon kesitleri.

2019-2020 dengelenmiş yükseklikleri farklarına bakıldığında; güzergâhların hepsinde deformasyon gözlemlenmektedir. Kesitler incelendiğinde deformasyon miktarları tüm güzergâhlarda aynı trendi ve aynı hızı göstermemektedir. 1-2-3-7'nolu güzergâhlardaki deformasyon trendinin aynı olduğu fakat hızının 2 kata çıktığı görülmüştür. 9'nolu güzergâhın deformasyon trendinin diğer yıllarla aynı olduğu, 6'nolu güzergâhın sabit diğer yıllarla aynı olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 4'nolu güzergâhlar 2018-2019'daki trendden farklı olduğu gözlemlenmiştir; 2016-2017, 2017-2018 yıllarındaki trende dönmüştür. 5'nolu güzergah ise diğer yıllara göre daha farklı bir trend gösterip; önce sabit kalıp düşüşe geçmiş ve sonra yükselişe geçmiştir (Şekil 4.13).



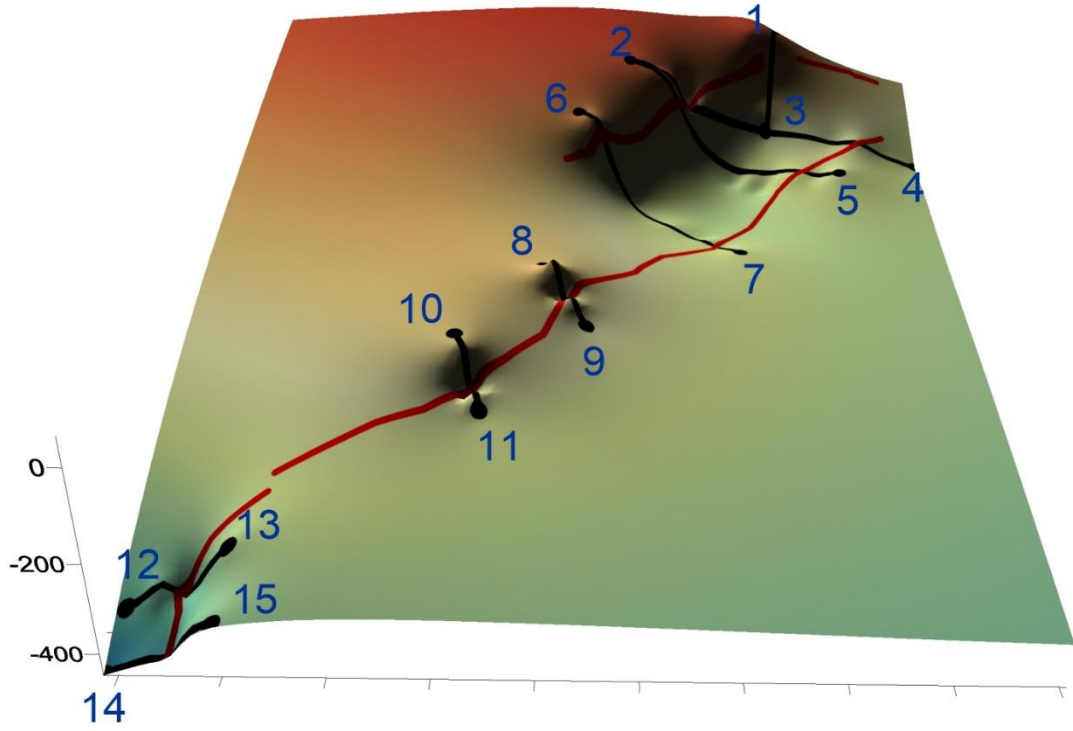
Şekil 4.14 2016-2020 deformasyon haritası; harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

2016-2020 yılları arasındaki bütün ölçüler incelendiğinde ortaya çıkan deformasyon haritasında, jeodezik ağda düşey yönde ciddi bir hareket olduğu görülmüştür. 2016-2020 yılları arasındaki toplam 5 kampanya sonunda; jeodezik ağımda ortalama 195-450 mm'lik bir deformasyon vardır.



Şekil 4.15 Güzergâhların 2016-2020 yılları arasındaki deformasyon kesitleri

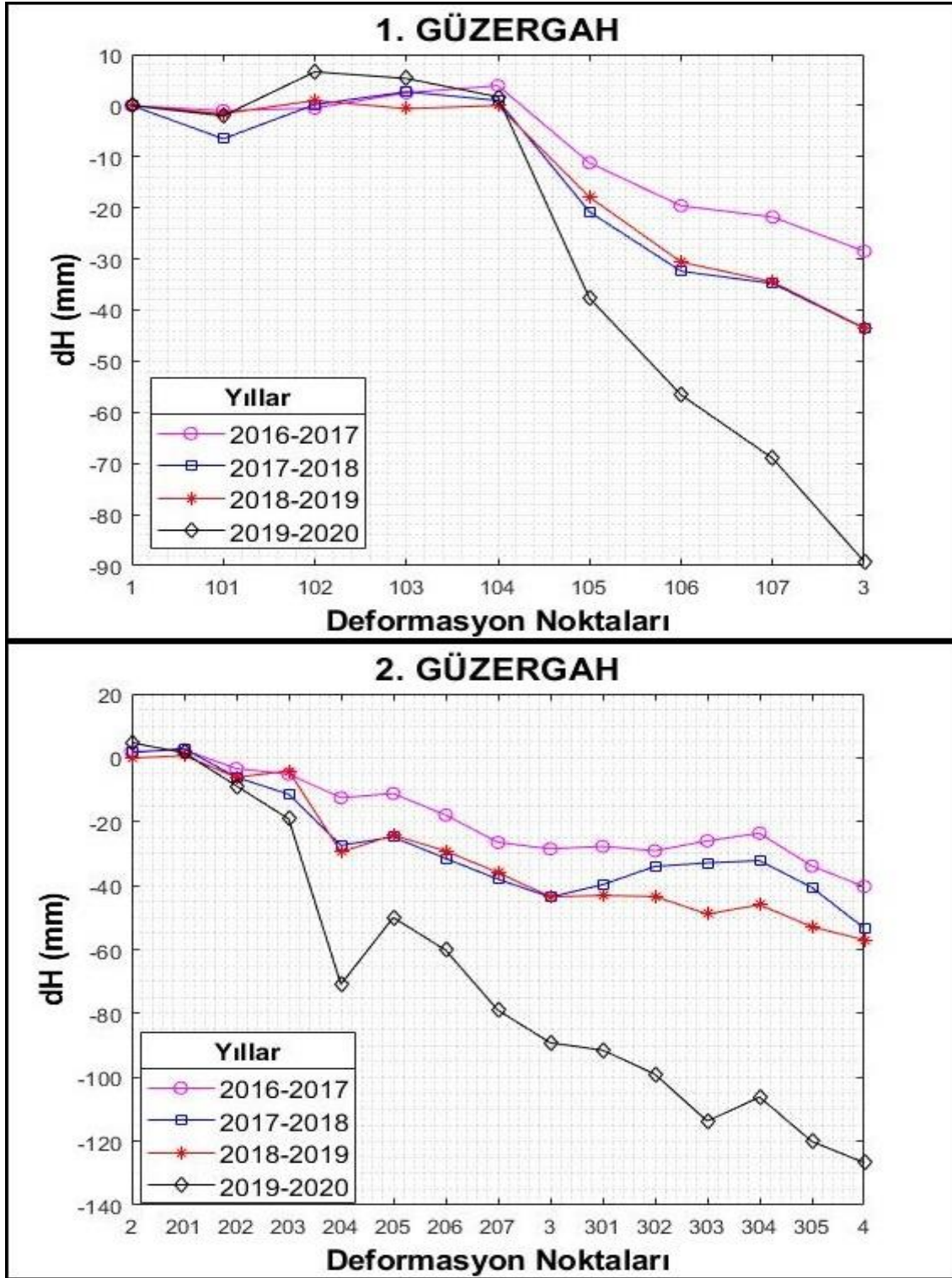
5 yıllık ölçü farkları değerlendirildiğinde tüm güzergâhların kesitleri incelendiğinde; 1-2-3-7'nolu güzergâhların genel olarak düşüş trendi göstermektedir. 4'nolu güzergâhın trendi yıllara göre farklılıklar gösterse de yükselen, düşüşe geçen ve tekrar yükselen bir trend göstermektedir. 5'nolu güzergâhın trendi yıllara göre farklılıklar gösterse de yükselen, sabit veya düşüşe geçen, yükselen bir trend göstermiştir. 6'nolu güzergâhın yıllara göre farklılık göstermediği ilk olarak sabit kalıp, düşüşe geçen ve tekrar yükselen bir trend göstermektedir. 9'nolu güzergâhın yıllara göre farklılık göstermediği yükselen, düşüşe geçen, yükselen bir trend göstermiştir (Şekil 4.15).



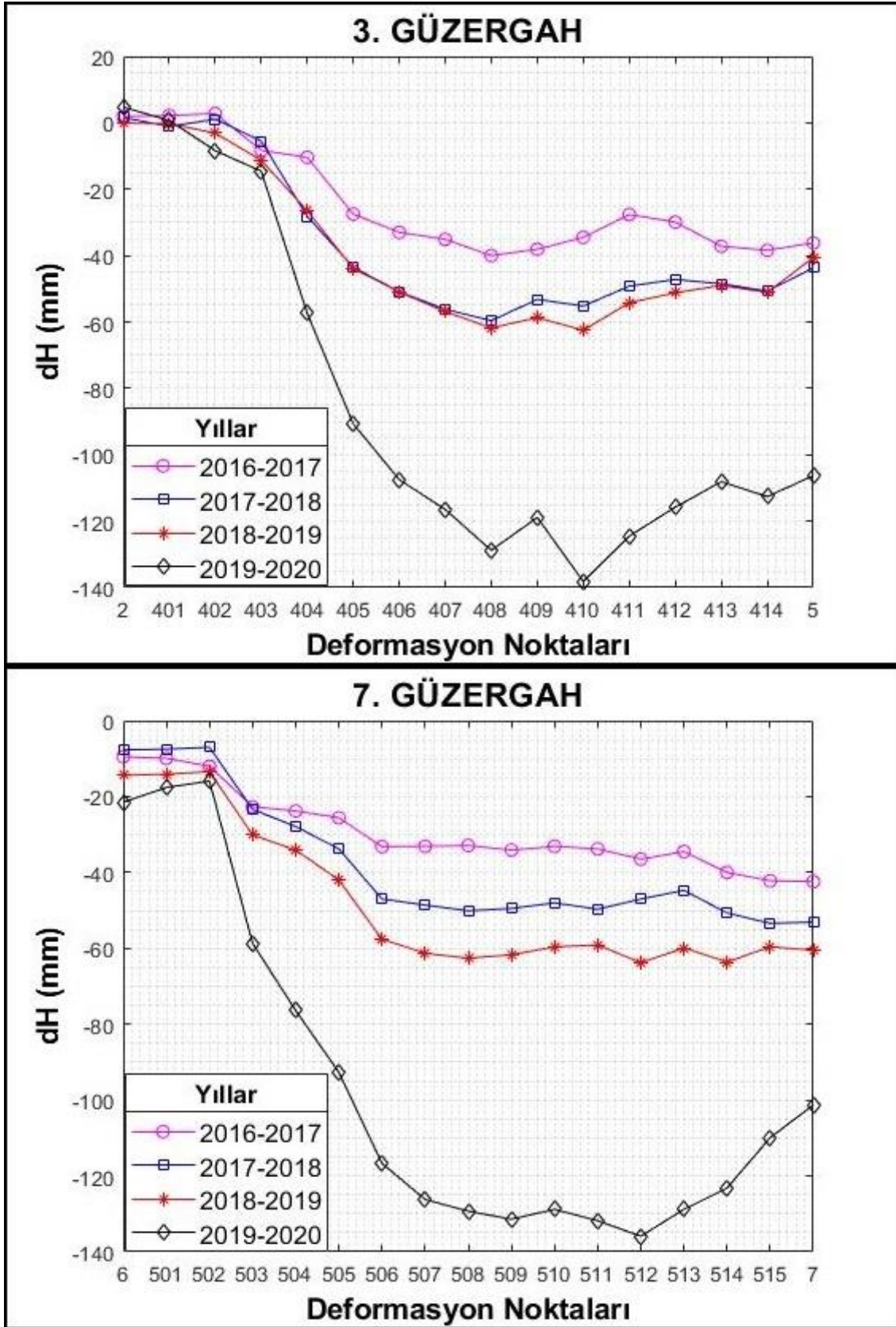
Şekil 4.16 Güzergâhların 2016-2020 yılları arasındaki deformasyon miktarına göre 3 boyutlu haritası, harita üzerindeki kırmızı çizgiler yüzey deformasyon hattını, siyah çizgiler ise nivelman hattını, numaralar ise ana jeodezik ağı noktalarıdır.

3 boyutlu deformasyon haritası incelendiğinde jeodezik ağıdaki çökmeler daha anlaşılır olmuş ve güzergâhların yıllara göre trendleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. 1(1-3), 2(2-3-4), 3(2-5), 7(6-7)'nolu güzergâhlarının kesitlerinde olduğu gibi sert ve keskin düşmeler izlenmiştir. Bu düşmelerin başlangıcı olarak yüzey deformasyonlarının geçtiği doğrultudan başlaması da görülmektedir. 9(8-9), 6(10-11)'nolu güzergâhın düşüşe geçtiği yerde yüzey deformasyonlarının doğrultusunda olduğu görülmektedir. 5(14-15), 4(12-13)'nolu güzergâhların yükselişe geçtikleri yerde yüzey deformasyonlarının doğrultusunda olduğu görülmektedir.

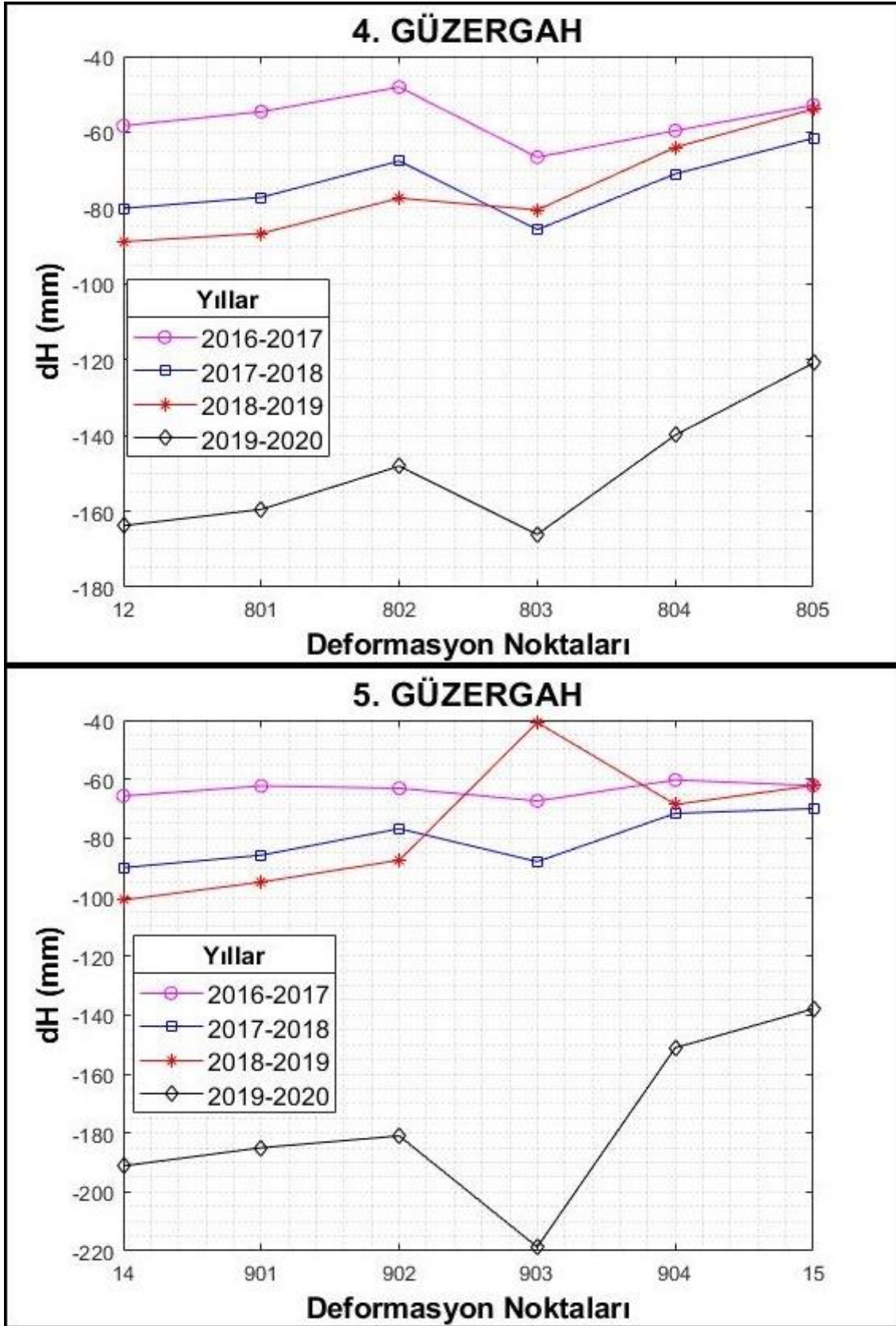
Güzergâhlardaki tüm kampanya ölçülerine tek grafikte incelenerek meydana gelen deformasyonun yıllık miktarları incelenmeye çalışılmıştır.



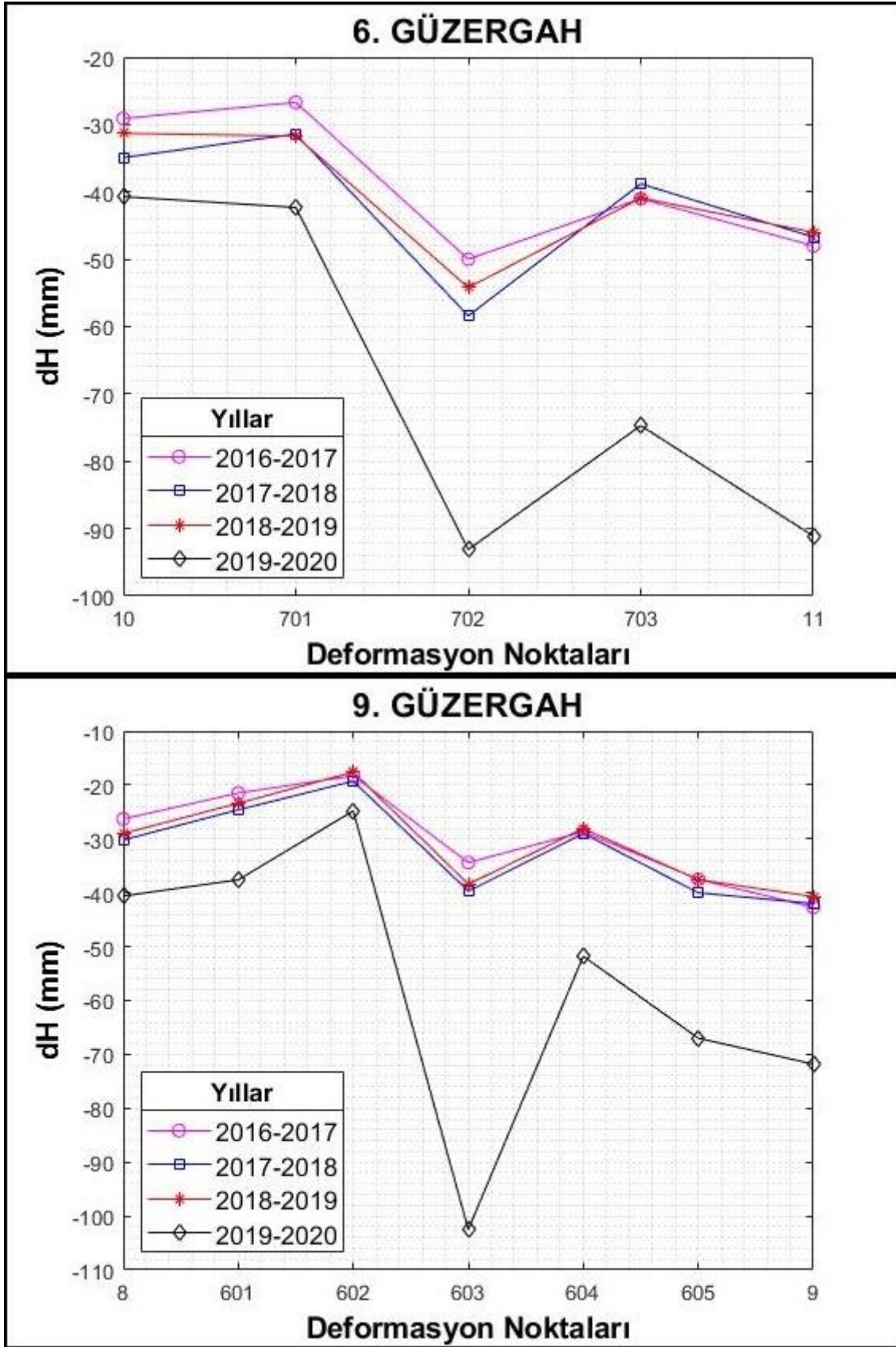
Şekil 4.17 1 ve 2'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.



Şekil 4.18 3 ve 7'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.



Şekil 4.19 4 ve 5'olu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.

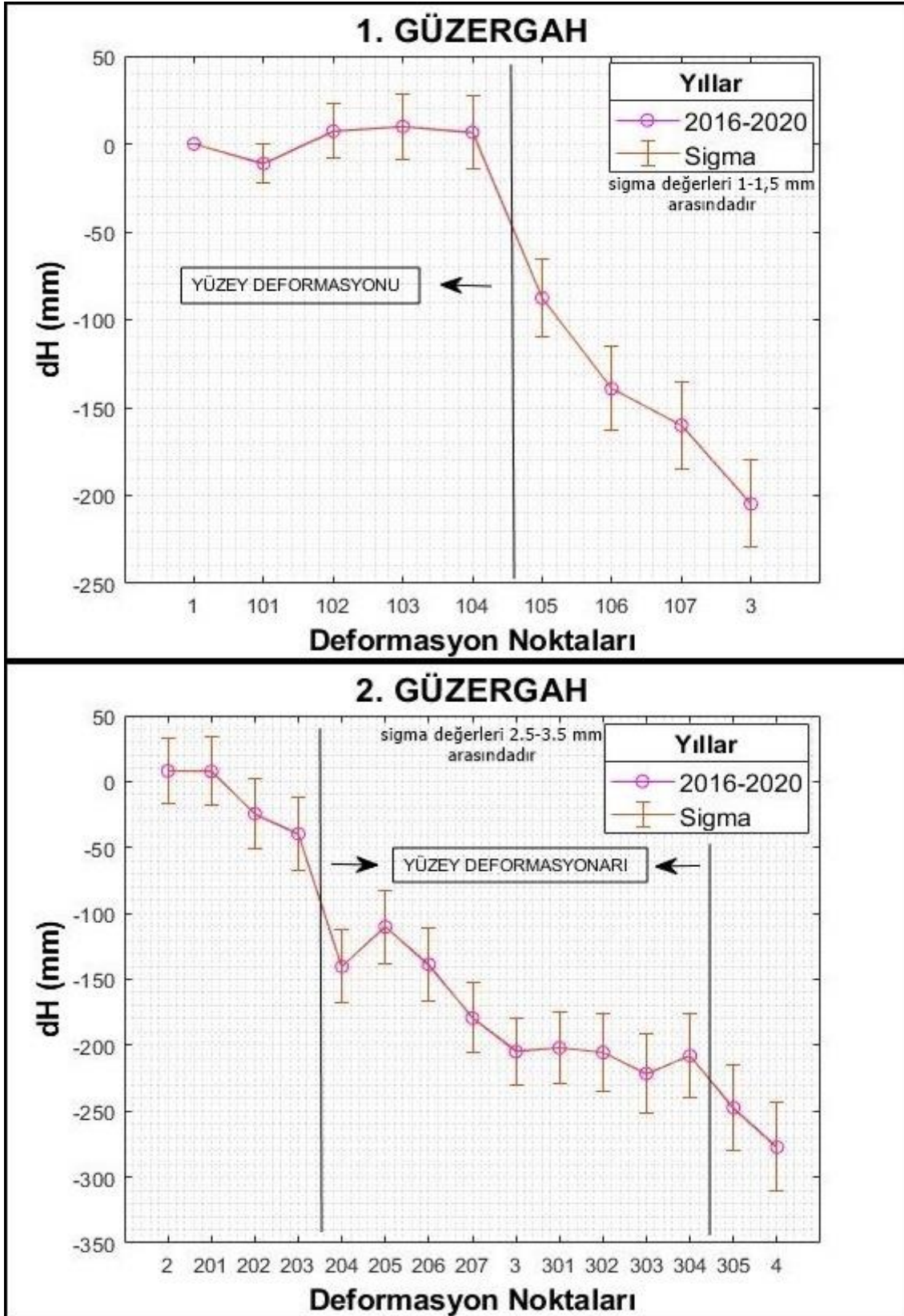


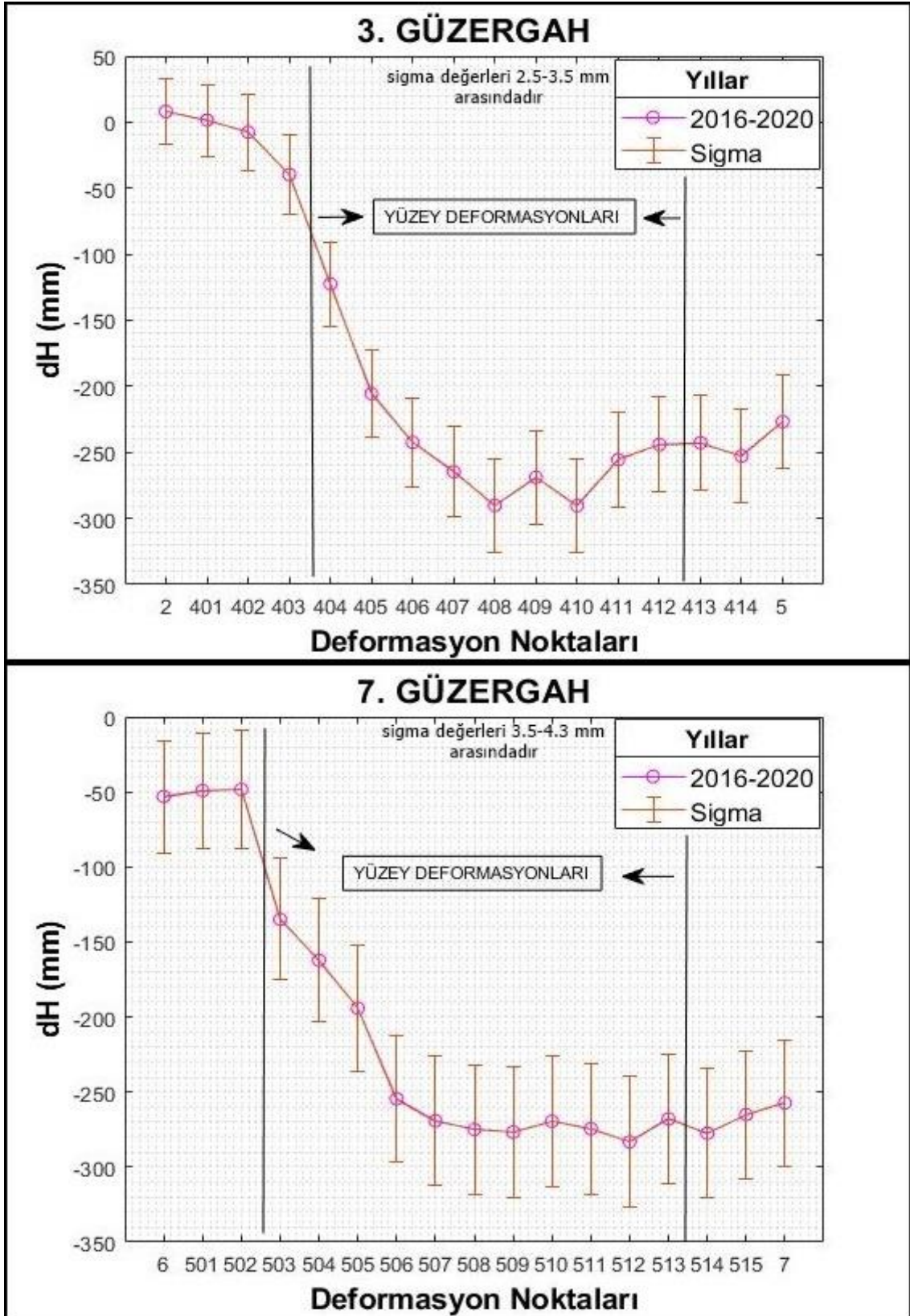
Şekil 4.20 6 ve 9'nolu güzergâhın yıllara göre deformasyon grafiği.

1'nolu güzergâhın içerisinde bulunan deformasyon noktalarını incelediğimizde; 104'nolu itibaren düşey yönünde deformasyon izlenmektedir. Yüzey deformasyonlarının bu noktadan sonra olduğu bu grafiklerde de görülmektedir (Şekil 4.16-4.17). Bu hareketler diğer güzergâhlarda da yüzey deformasyonlarının bulunduğu yerler ile uyum içindedir. Bununla birlikte şekil 4.17-4.18-4.19-4.20 incelendiğinde tüm güzergâhlarda 2016-2019 yılları arasındaki yıllık deformasyonlar birbirlerine yakın değerler olmasına rağmen 2019-2020 yılında deformasyon miktarında 2 kat artış görülmektedir. 2016-2020 yılları arasında oluşan bu deformasyonların yüzeye yansımaları sonucu 9. Güzergâhta yüzey deformasyonlarının üzerinde olan yapılar tahliye edilmiştir (Şekil 4.21).

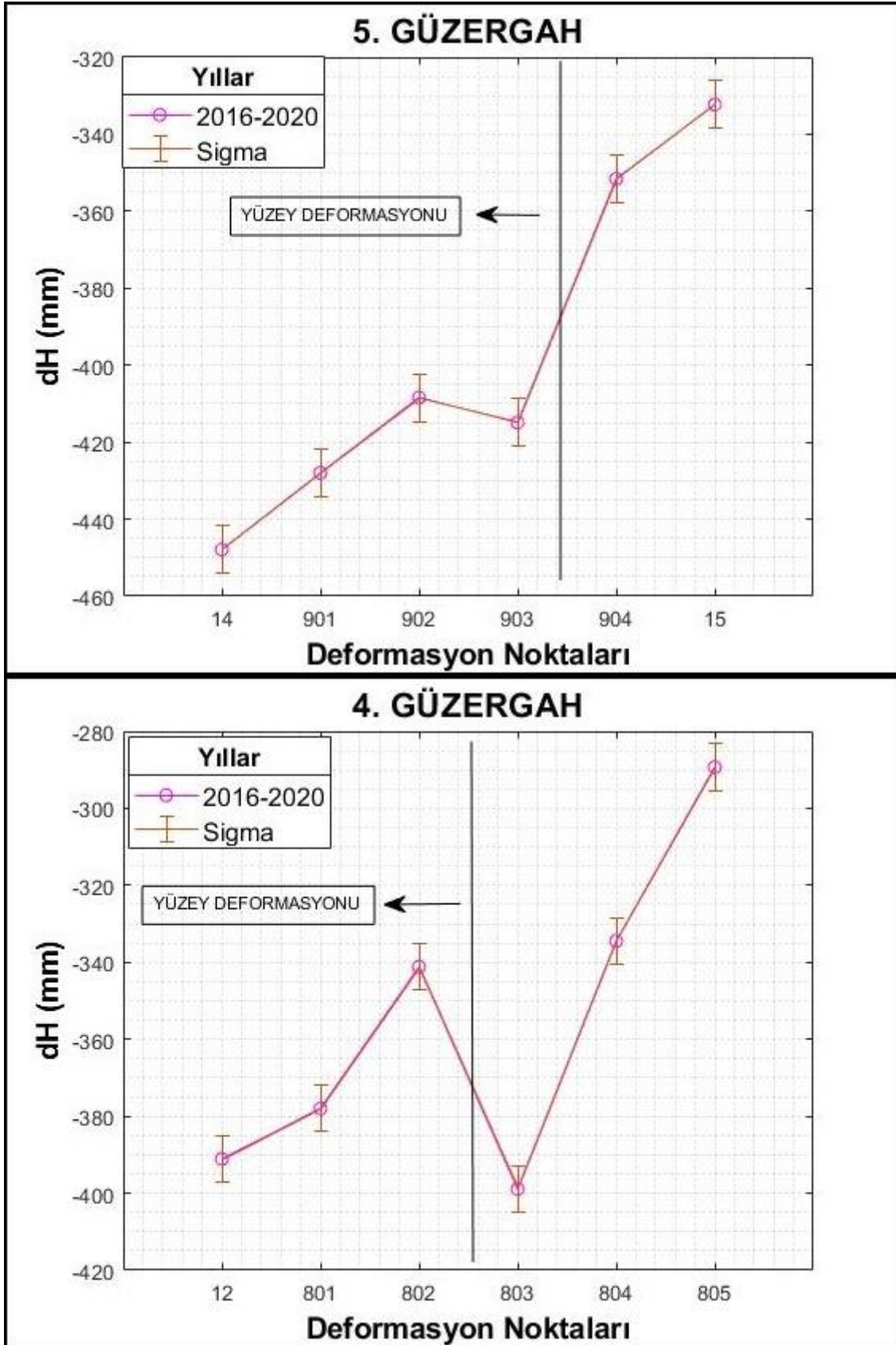


Şekil 4.21 A ile gösterilen gösterilen fotoğraf 2016-2020 deformasyon miktarının 3 boyutlu gösterimi, B ile gösterilen fotoğraf 9'nolu güzergâhtaki bir yapının 2015 yılına ait fotoğrafı, C ile gösterilen fotoğraf 9'nolu güzergâhtaki bir yapının 2020 yılına ait görüntüsü (C ile gösterilen fotoğrafta kırmızı çizgi yüzey deformasyonunu temsil etmektedir.).

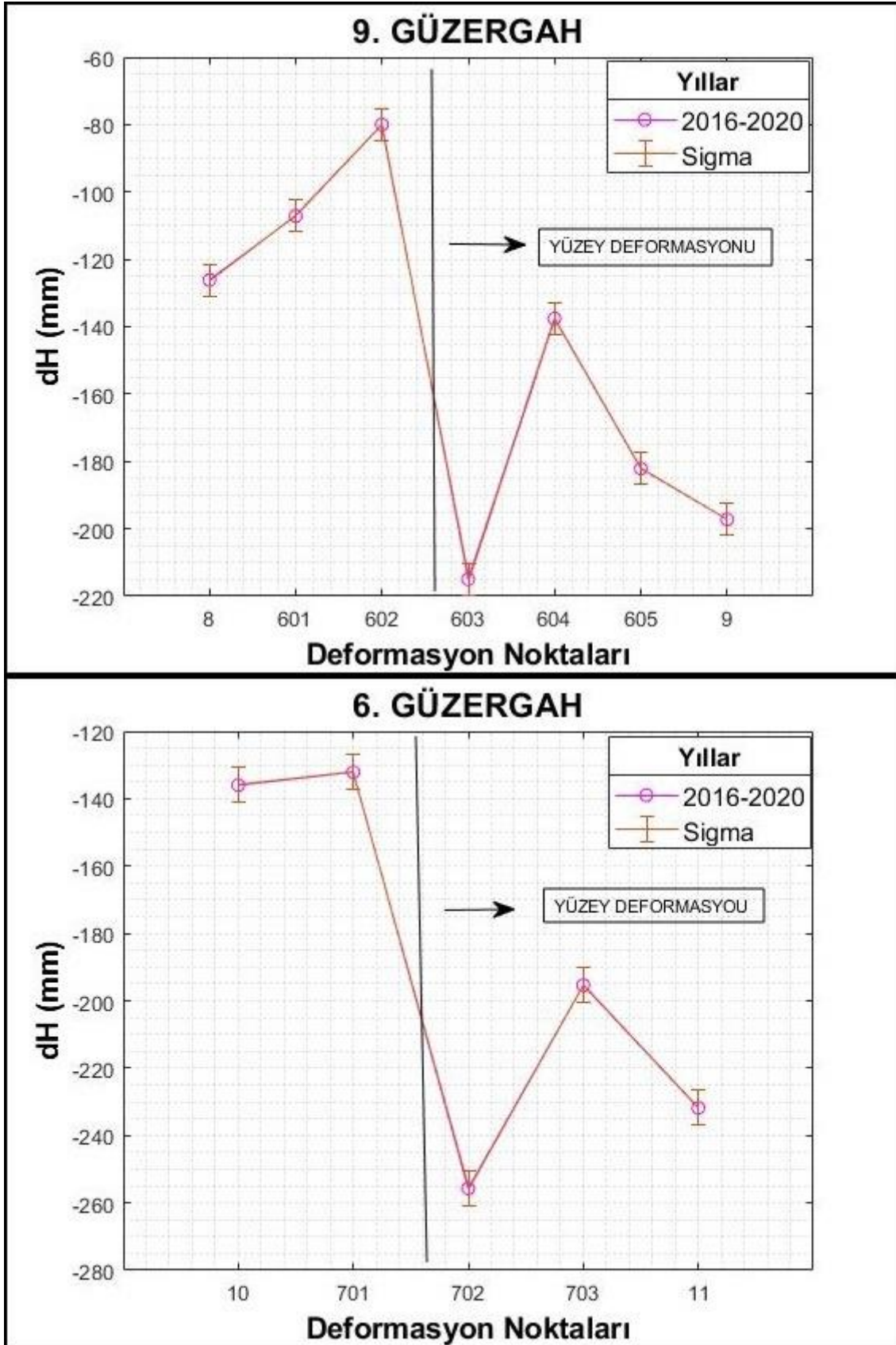




Şekil 4.23 3 ve 7' nolu güzergâhların deformasyon grafiği (Sigma büyüklükleri gerçek değerinin 10 katıdır).



Şekil 4.24 4 ve 5’olu güzergâhların deformasyon grafiği.



Şekil 4.25 6 ve 9’olu güzergâhların deformasyon grafiği.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bolvadin ilçe merkezindeki asismik şekilde oluşan yüzey deformasyonlarını hassas nivelman tekniği ile incelenmesi için 2016 yılında bölgeye deformasyonları dik kesecek şekil 8 profil üzerine 81 RS noktasının tesisi edilmiştir. Tesis edilen bu ağ üzerinde 2016-2018 yıllarında farklı çalışmalar kapsamında 3 kampanya nivelman ölçüsü yapılmıştır (Yalçın 2019, Bozkuş 2019). Bu çalışma kapsamında aynı ağ üzerinde 2019-2020 yıllarında 2 kampanya daha nivelman ölçüsü yapılmıştır. Tüm kampanyalar önce EKK yöntemine serbest ağ dengelemesi yapılarak her nokta için dengelenmiş yükseklikleri hesaplanmıştır. Serbest ağ dengelemesi sonucu karesel ortalama hatalar 2-3 mm civarında çıkmıştır. Serbest ağ dengelemesinden sonra uyuşumsuz ölçü testi Pope yöntemine göre yapılmış ve uyuşumsuz ölçü olmadığı görülmüştür. Daha önce aynı jeodezik ağda çalışmada ana ağ noktalarında S-transformasyonu deformasyon analizi yapılmıştır. GLOBAL TEST sonucunda deformasyon olduğunu tespit edilmiştir. Elde edilen dengelenmiş yükseklikler kullanılarak yıllar arasında yükseklik farkı grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler incelendiğinde;

2016-2017 yılında ortalama deformasyon miktarı 25-55 mm arasında değişmektedir. Şekil 4.7 incelediğinden yüzey deformasyonları boyunca; Kuzey-Batı'daki blok yükseldiği veya sabit kaldığı, Güney-Doğu yönündeki bloğun düştüğü görülmüştür. 2017-2018 ile 2018-2019 yıllarında deformasyon büyüklüğü benzer şekilde 25-65 mm arasındadır. 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon hızı diğer yıllar arasındaki deformasyon hızıyla benzerlik göstermeyip, nerdeyse 2 katına çıkmıştır. 2019-2020 yılları arasındaki deformasyon büyüklüğü 80-95 mm'dir.

2016-2020 yılları arasındaki bütün ölçüler incelendiğinde ortaya çıkan deformasyon haritasında, jeodezik ağda düşey yönde ciddi bir hareket olduğu görülmüştür. 2016-2020 yılları arasındaki toplam 5 kampanya sonunda; jeodezik ağımda ortalama 195-450 mm'lik bir deformasyon hesaplanmıştır.

Güzergahlar tek tek incelendiğinde 2'nolu güzergâhın içerisinde bulunan 2-201-202-203'nolu noktalara kadar sabit bir trend, 204'nolu noktada 2016-2017, 2017-2018, 2018-

2019 yaklaşık aynı miktarda düşey yönlü trend yaparken 2019-2020 arasında 2 katı kadar ve daha keskin düşey yönde bir trend oluşmuştur. 205-206-207-301-302-303-304-305-4'nolu noktalarda ise yıllara göre aynı trendde olduğu görülmüştür.

3'nolu güzergâhın içerisinde bulunan noktalar incelendiğinde; 2-401-402-403'nolu noktalara kadar sabit bir trend yaptığı, 404-405-406-407-408'nolu noktalarda düşey yönde bir trend, 409'nolu noktada ise 2016-2017, 2017-2018, 2018-2019 yıllarında aynı trendde sahipken, 2019-2020 yıllarında keskin bir şekilde yukarı yönde bir trend yaptığı, 410-411-412-413-414-5'nolu noktalarda ise aynı trendde devam ettiği görülmüştür. Benzer sonuçlar diğer güzergâhlarda da görülmüştür.

Tüm sonuçlar incelendiğinde deformasyonun günümüze kadar devam ettiği gözlenmektedir. Bununla birlikte binalarda deformasyonların artması nedeniyle ağır hasarlı yapıların sayılarının arttığı ve yapıların boşaltılmaya başlandığı gözlemlenmiştir.

Bu deformasyonların kökenleri konusunda farklı çalışmalar yapılmıştır. Özkaymak vd. (2019) yüzey deformasyonları üzerinde yaptıkları hendek tabanlı paleosismoloji çalışmalarında bu yüzey deformasyonların geçmişte deprem üreten Bolvadin Fayı üzerinde geliştiği ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar bu deformasyonların kökeninin büyük ölçüde yeraltı su seviyesi düşümlerine bağlı konsolidasyon oturmalarından kısmen de bölgedeki aktif tektonizmadan kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte İmamoğlu vd. (2020) yaptıkları çalışmalarda bu deformasyonların kökeninin sadece yeraltı sularında meydana gelen düşüşlerin neden olduğunu bildirmişlerdir. Tiryakioğlu ve Bozkuş (2020) yaptıkları çalışmada yeraltı suları ile deformasyonların arasında orta seviyede korelasyon olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte düzenli nivelman ölçümlerine göre, deformasyonların özellikle yağışın fazla olduğu kış aylarında da devam etmesi, yakın geçmişte deprem üreten Bolvadin Fayı üzerinde ve çizgisel olarak ilerlemesi, grabenin diğer kenarlarında da yeraltı sularında düşmeler olmasına rağmen bu şekilde deformasyonların oluşmaması, bu deformasyonların 3 şubat 2002 Çay depremleri (Mw:6.3 ve 6.0) sonrasında gözlenmeye başlamış olması, yüzey deformasyonlarının

yeraltı su seviyeleri ile birlikte tektonik kökenli bir nedeni olduğu düşüncesi vermektedir.

Bu çalışmalarda elde edilen bilgiler ışığında;

- Deformasyonun hızlanması nedeniyle Bolvadin ilçe merkezinde yüzey deformasyonlarının üzerindeki mevcut yapıların çökme tehlikesi vardır. Afyonkarahisar ve yakın çevresindeki diri faylar üzerinde meydana gelebilecek olası şiddetli bir deprem de bu deforme binaların yıkılmasına sebep olabilecektir. Bu nedenle bu tür yapıların tespit edilmesi ve ilgili kanun kapsamında afet riski olmayan alanlara taşınması,
- Yüzey deformasyonlarının üzerine ve etki alanına yapılaşmanın engellenmesi için deformasyonların imar planına esas ölçekte güncel haritalarının yapılması ve fay sakınım bantlarının oluşturulması,
- GNSS, SAR ve nivelman ölçüleri ile deformasyonun izlenmesinin devam etmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Aydın C, 2001, Yer Kabuğundaki Düşey Deformasyonların Analizinde Statik Modelin Güvenirliği Üzerine Bir İnceleme, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, İstanbul.
- Bayrak T, 2011, Dengeleme hesabı-II ders notları, Gümüşhane Üniversitesi, 105s Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği, Gümüşhane.
- Bozdemir N, 2006, Jeodezik Ağların Üç Boyutlu Dengelenmesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Samsun.
- Bozkuş H B, 2019, Bolvadin Fayındaki Yüzey Deformasyonlarının Yer Altı Suları ile İlişkisinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 61s, Afyonkarahisar.
- Ceylan A, 1993, Presizyonlu Nivelman Yerine Trigonometrik Nivelman Yönteminin Kullanılabilirliği Üzerine Bir Çalışma, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 112s, Konya.
- Caspary W F, 1988, Concepts of Network and Deformation Analysis, Monograph 11 School of surveying, the Univesity of New South Wales, Australia.
- Demirel H, 2005, Dengeleme Hesabı, YTÜ Lisans Ders Notları, İstanbul
- Doğanalp S, Turgut B, 2009, Statik ve Kinematik Modelde Deformasyon Analizi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi, 24, 31-44.
- Doğan A, 2019, Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Tekniği İle Belirlenmesi: Sarıgöl Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Afyonkarahisar.
- Dönmez E, Tiryakioğlu İ, 2018, Gediz Fayı Yerkabuğu Hareketlerinin GNSS Gözlemleri ile İzlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18, 1110-1117.

- Emre Ö, Doğan T Y, Özalp S, Olgun Ş, Elmacı H, 2011, 1: 250.000 scale active fault map series of Turkey, Afyon (NJ 36-5) Quadrangle. General Directorate of Mineral Research and Exploration;(Serial number: 16), General Directorate of Mineral Research and Expansion (MTA), Ankara.
- Erol S, 1999, Karasu Viyadüğünde GPS ile Deformasyon Ölçmeleri ve Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, İstanbul.
- Gülal E, 2003, Mühendislik Jeodezisinde Sistem Analizi, Basılmamış Lisansüstü Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gürkan O, Özener H, Garagon Doğru A, Yılmaz O, Turgut B, 2005, Tektonik Deformasyonların Jeodezik Ölçme Teknikleri ile İzlenmesi (Kafz Batı Kesimi Çalışmaları), TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı 28 Mart – 1 Nisan 2005, Ankara.
- Hekimoğlu Ş, Erenoğlu R C, 2007, Jeodezik Ağlarda Uyuşumsuz Ölçülerin Klasik Yaklaşım ve Robust Yöntemlerle Belirlenmesi, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 97, 3-14.
- İnal C, 1990, Yerkabuğu ve Yapılardaki Deformasyonların Oluşumu ve Yorumu, Harita ve Kadastro Mühendisleri Dergisi, 66, 42-48.
- Kalkan Y, 2009, Atatürk Barajında Deformasyon İzleme Çalışmaları ve Düşey Deformasyonlar, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 11-15 Mayıs 2009, Ankara
- Kalkan Y, Alkan R M, Baykal O, Yanalak M, Erden T, Yıldırım H, 2003, Heyelanların Jeodezik ve Geoteknik Yöntemlerle İzlenmesi Ambarlı Liman Bölgesinde Bir Uygulama, 1. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 30-31 Ekim 2003, İstanbul, 91-105.
- İmamoğlu M, Kahraman F, Çakır Z, Şanlı F B, 2020, Çok Temporal InSAR Tekniği ve Sentinel-1 Verileri ile Bolvadin Alçalma Analizi, Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Konferansı (SIU), 5-7 Ekim 2020, Gaziantep, 1-4.

- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Tiryakioğlu İ, Baybura T, 2017, Bolvadin'de (Afyon-Akşehir Grabeni, Afyon) Gözlenen Yüzey Deformasyonlarının Jeolojik, Jeomorfolojik ve Jeodezik Analizi, Türkiye Jeoloji Bülteni, 60, 169-188.
- Özkaymak Ç, Sözbilir H, Geçievi M, Tiryakioğlu İ, 2019, Afyon Akşehir Grabeni Bolvadin Fayı üzerinde Geç Holosen kosismik kırılma ve asismik sünme, Batı Anadolu, Türk Yer Bilimleri Dergisi, 28, 787-804.
- Öztürk E, Şerbetçi M, 1995, Dengeleme Hesabı Cilt II. Baskı, Sayfa 150-155, Trabzon
- Sylvester A G, 1984, Leveling Precision and Benchmark Motions, Journal of Geophysical Research, 89, 7949-7956.
- Sylvester A G, 1986, Nearfield Tectonic Geodesy, National Academy Pres, 164-180.
- Sylvester A G, 1995, Nearfield Vertical Displacement in the Creeping Segment of the San Andreas Fault, Tectonophysics, 247, 4-25.
- Tekdal E, 2007, Deprem Sonrası Meydana Gelen Deformasyonların Jeodezik Yöntemlerle Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, İstanbul.
- Tiryakioğlu İ, Bozkuş H B, 2020, Determination of surface deformations in Bolvadin Fault by the precision levelling method and investigation of the relationship with underground water, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 61, 499-516.
- Tiryakioğlu İ, Uğur M A, Yalçın M, Baybura T, Yılmaz M, Özkaymak Ç, vd., 2017, Akşehir Simav Fay Sistemindeki Güncel Tektonik Hareketlerinin İzlenmesi: Nivelman Çalışmaları, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Eskişehir.
- Turan F, 2007, Dolgu Tipli Barajlarda Düşey Değişimlerin Hassas Trigonometrik Nivelman Yöntemiyle Belirlenmesi Üzerine Bir İnceleme, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, İstanbul.
- Uysal A, 2012, Alibey Barajı'nda Düşey Yöndeki Hareketlerin Belirlenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, İstanbul

- Ünver M, 1988, Düşey Yöndeki Yerkabuğu Hareketlerinin Duyarlıklı Nivelman Ölçüleri ile Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Trabzon
- Ünver M, 1994, Düşey Yöndeki Yer Kabuğu Deformasyonlarının Kinematik Model ile Belirlenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 137s, Trabzon
- Yalçın M, 2019, Bolvadin Fayı Yüzey Deformasyonlarının Hassas Nivelman Ölçüleri ile İzlenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 69s, Afyonkarahisar
- Yalçınkaya M, 1996, Nivelman Ağlarında Duyarlık ve Güven ölçütleri, Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 80, 73-84.
- Yalçınkaya M, 2000, Güncel Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi. Harita Dergisi, 124, 38-54.