

InSAR ve GPS Teknikleri ile Elde Edilen Düşey Yer Değiştirme Vektörlerinin Karşılaştırılması

Berkay Yalçinkaya¹, Umut Korkmaz¹, Oktay Ağrı¹, Pakize Küreç Nehbit^{1,*}

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41001 Kocaeli, Türkiye

Özet

Herhangi bir kuvvetin etkisi ile bir yüzeyde oluşan şekil, konum ve boyut değişikliklerine deformasyon adı verilmektedir. Deformasyonlar yersel jeodezik yöntemlerle belirlenebileceği gibi, SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) görüntülerinin işlenmesi gibi uzaktan algılama teknikleri ile de belirlenebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş ilinde Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerinde meydana gelen depremlerin etkisiyle oluşan düşey yer değiştirme vektörlerinin InSAR ve GPS teknikleriyle belirlenmesi ve yer değiştirme vektörleri arasındaki farkın istatistiksel olarak analiz edilmesidir. Bu kapsamda deprem bölgesinde TUSAGA-Aktif istasyonlarından oluşan bir jeodezik GPS ağı tasarlanmıştır. InSAR tekniğinde ise deprem bölgesini kapsayan, 1-28 Şubat 2023 tarih aralığında, deprem öncesi ve sonrası için iki SAR görüntüsü kullanılmıştır. EKZ1 istasyonunda GPS tekniği kullanarak 457.42 cm yer değiştirme ve InSAR tekniği kullanarak uydu bakış açısı yönünde -13.51 cm yer değiştirme elde edilmiştir. İstatistiksel testlerde, EKZ1 ve MAR1 istasyonlarında GPS ve InSAR tekniklerinden elde edilen düşey yer değiştirme vektörleri kullanılmıştır. EKZ1 ve MAR1 istasyonlarındaki düşey yer değiştirme vektörleri arasındaki fark, sırasıyla 0.80 cm ve 3.67 cm olarak elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

Jeodezik Ağlar, GPS, InSAR, Düşey Yer Değiştirme.

Comparison of Vertical Displacement Vectors Determined with InSAR and GPS Techniques

Abstract

Changes in shape, position and size occurring on a surface because of any force are named deformation. Deformations can be detected using both terrestrial geodetic methods and remote sensing techniques, e.g., processing of SAR (Synthetic Aperture Radar) images. The aim of this study is to obtain the vertical displacement vectors formed by the earthquakes with magnitudes of Mw 7.7 and Mw 7.6 that occurred in Kahramanmaraş on the 6th of February 2023, using InSAR and GPS techniques, and statistically analyse the differences between them. Within this scope, a geodetic GPS network consisting of TNPNGN-Active stations was generated in the study area. In the InSAR technique, two SAR images were used between 1-28 February 2023, before and after the earthquake, within the study area. At the EKZ1 station, a displacement of 457.42 cm was obtained using the GPS technique, and a displacement of -13.51 cm in the line of sight direction was obtained using the InSAR technique. The vertical displacement vectors obtained from GPS and InSAR techniques at the EKZ1 and MAR1 stations have been used for the statistical tests. The differences between the vertical displacement vectors at the EKZ1 and MAR1 stations were computed as 0.80 cm and 3.67 cm, respectively.

Keywords

Geodetic Networks, GPS, InSAR, Vertical Displacement.

1. Giriş

Türkiye önemli tektonik hareketlere sahip Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hattı (DAF) ve Batı Anadolu Fay Hattı (BAF) üzerinde yer almaktadır. Sol yanal harekete sahip doğrultu atım özellikli DAF (Goldberg vd., 2023), Afrika, Sina ve Arap levhalarının etkisiyle Avrasya levhasına göre batıya doğru hareket etmektedir (Özkan vd., 2023). 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ta Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerinde meydana gelen ve aralarında 90 km mesafe bulunan deprem çiftleri (Okuwaki vd., 2023) nedeniyle sırasıyla 350 km ve 160 km uzunluğunda kırılmalar oluşmuştur (Melgar vd., 2023). Kobayashi vd. (2024)'de yaptıkları çalışmada 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerini deprem çiftleri (Melgar vd., 2023; Okuwaki vd., 2023) olarak isimlendirmek yerine, aralarında 9 saat fark bulunan Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerindeki depremleri ana şok ve artçı deprem olarak tanımlamaktadır. Tektonik hareketler sonucunda meydana gelen yüzey deformasyonlarının araştırılması ve sonuçların analiz edilmesi birçok çalışmanın

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (262) 3033245 Faks: +90 (262) 3033003
E-posta: berkay.19.yalcinkaya@hotmail.com (Yalçinkaya B),
umutkorkmaz167@gmail.com (Korkmaz U), oktayagarii@gmail.com (Ağrı O),
pakize.kurec@kocaeli.edu.tr (Küreç Nehbit P)

Gönderim Tarihi / Received : 08/12/2025
Kabul Tarihi / Accepted : 07/05/2026

konusudur. Deformasyonlar yersel jeodezik yöntemlerle inceleneceği gibi, SAR görüntülerinin işlenmesi gibi uzaktan algılama teknikleri ile de belirlenebilmektedir.

Jeodezik ağlarda deformasyon analizleri için statik, kinematik ve dinamik deformasyon modelleri kullanılmaktadır. Deformasyon analizleri, farklı zamanlarda ölçülen jeodezik ağlardan elde edilen dengeli koordinatlar ile bunlara ait ters ağırlık matrislerinin kullanılması ile uygulanan istatistiksel analizlere dayanmaktadır (Öztürk vd., 2006). Deformasyon analizlerinin temelleri ve istatistiksel analiz yöntemleri [Caspary \(2000\)](#)'de detaylı şekilde açıklanmıştır. Günümüze kadar pek çok çalışmada jeodezik GPS ağları kullanılarak deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etkisini araştırmak için 8 TUSAGA-Aktif istasyonundan oluşan epok oturumlu bir jeodezik GPS ağında statik modelde deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre EKZ1 istasyonunda deformasyon 457.42 cm olarak belirlenmiştir. Öte yandan, [Özkan vd. \(2023\)](#)'de yaptıkları çalışmada 73 sabit GNSS istasyonu ve 40 kampanya gözlem noktası kullanarak Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerindeki 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinin etkisi ile oluşan yer değiştirmeleri ve fay kayma dağılımlarını araştırmıştır. [Özkan vd. \(2023\)](#)'de en büyük yer değiştirme 466 cm olarak EKZ1 TUSAGA-Aktif istasyonunda belirlenmiştir. Farklı çalışmalarda EKZ1 istasyonu için elde edilen deformasyon değerlerindeki farklılık, kullanılan jeodezik ağ yapılarının farklılığından ve datum seçiminden ileri geldiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, [Ergintav vd. \(2024\)](#)'te yaptıkları çalışmada TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait verileri kullanarak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri nedeniyle uzak alanlarda kabuk deformasyonlarının meydana geldiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle deprem etki alanını temsil eden bir jeodezik GPS ağının oluşturulması elde edilecek deformasyon vektör bileşenlerinin tutarlılığını etkileyebilecektir. [Konakoglu \(2021\)](#)'de jeodezik deformasyon ağı kullanılarak statik, kinematik ve dinamik deformasyon modelleri ile Deriner Barajındaki değişimler izlenmiştir. Bununla birlikte, dinamik deformasyon modeli ile baraj deformasyonu ve su seviyesi değişimi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışma sonucunda su seviyesi değişimlerinin baraj deformasyonlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca, parametre kestirim yöntemlerinden biri olan en olasılıklı parametre kestirim yönteminin genişletilmiş versiyonu olarak tanımlanan karesel Msplit kestirimi deformasyonların belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasındadır ([Pleterski vd., 2025](#)). [Solak vd. \(2025\)](#)'de 17 GNSS istasyonundan oluşan jeodezik GNSS ağı kullanılarak Kahramanmaraş depremlerinin Erzurum ili civarında meydana getirdiği co-sismik yer değiştirmeler ile bölgenin sismik parametreleri hesaplanmıştır.

InSAR tekniği ile uydu bakış açısı yönünde düşey deformasyonlar belirlenebilmektedir. Yatay ve düşey yöndeki deformasyonların InSAR tekniği ile belirlenebilmesi için başka kaynaklardan bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır (Helz, 2005). Bununla birlikte InSAR tekniği kullanılarak deprem kaynak parametreleri ([Çakır, 2003; Çetin, 2010](#)) ile fay geometrisi belirlenebilmekte ve deformasyon vektörleri ([He vd., 2023](#)) elde edilebilmektedir. Jia vd. (2023) yaptıkları çalışmada Kahramanmaraş merkezli depremlerin kırılma geçmişlerini InSAR ve GNSS gözlemlerini kullanarak araştırmıştır. Bununla birlikte [He vd. \(2023\)](#)'de InSAR, ALOS-2 SAR ve Sentinel-2 Optik verileri kullanılarak Kahramanmaraş depremlerinin kinematığı, fay geometrisi ve deformasyon haritaları belirlenmiştir. Bu çalışma ile 2023 Kahramanmaraş depremlerinin sol yanal doğrultu atımlı bir harekete sahip olduğu belirlenmiştir. [Kobayashi vd. \(2024\)](#)'de yaptıkları çalışmada ScanSAR gözlem yöntemini kullanarak InSAR tekniği ile yer değiştirme büyüklüklerini belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda elde edilen yatay yer değiştirme büyüklüklerinin düşey yer değiştirme vektörlerinden daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ise jeodezik GPS ağı kullanılarak EKZ1 istasyonu için lokal koordinat sisteminde yer değiştirme vektörünün doğu bileşeni -454.090 cm olarak elde edilmesine rağmen yukarı bileşeni -16.958 cm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar [Kobayashi vd. \(2024\)](#)'de elde edilen sonuçları desteklemektedir. [Sakkas \(2021\)](#)'de yaptığı çalışmada, 2020 yılında Samos adasında Mw 6.9 büyüklüğünde gerçekleşen depremin etkisiyle oluşan pre- ve co-sismik deformasyonlar GNSS ve InSAR verilerinin birleştirilmesi ile analiz edilmiştir. [Şengün \(2010\)](#)'da, InSAR tekniği ve GPS tekniği kullanılarak elde edilen yer değiştirme vektörleri arasındaki farkın nedenleri araştırılmıştır. Buna göre InSAR tekniğinde kullanılan sayısal yükseklik modelinin, atmosferik koşulların ve uydu yörünge bilgilerinin deformasyon vektör büyüklüklerini etkilediği belirtilmiştir. Bu çalışmadan farklı olarak, [Gül vd. \(2024\)](#)'te yaptıkları çalışmada C-bant genişliğindeki Sentinel-1A, X-bant genişliğindeki TerraSAR-X ve GPS verilerinden elde ettikleri uydu bakış açısı yönündeki hız bilgilerini ve düşey deformasyon hız bilgilerini karşılaştırmışlardır. GPS, TerraSAR-X ve Sentinel-1A verilerinden elde edilen hız bileşenlerindeki farklılığın, yatay hız bileşenlerinin hesaplamalarda ihmal edilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bununla birlikte çalışmamızda 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etkisi altındaki bölgede bulunan EKZ1 ve MAR1 TUSAGA-Aktif istasyonlarında Sentinel-1A ve GPS verileri kullanılarak elde edilen düşey yer değiştirme değerleri istatistiksel olarak karşılaştırıldığında MAR1 istasyonunda anlamlı bir fark olduğu görülmüştür. Oluşan bu farklılığın hesaplamalar sırasında yatay yer değiştirme vektörlerinin ihmal edilmesinin yanı sıra jeodezik ağ yapısının da etkili olduğu düşünülmektedir. [Poyraz ve Hastaoglu \(2020\)](#)'de yaptıkları çalışmada Gediz Graben'inde meydana gelen yüzey deformasyonlarını PSInSAR ve GNSS tekniklerini kullanarak uydu bakış açısı yönünde hız bileşenlerini belirlemişlerdir. [Poyraz ve Hastaoglu \(2020\)](#)'de yaptıkları bu çalışmada, sismik aktivitenin olduğu TRAZ istasyonunda her iki teknikten elde edilen LOS yönündeki hız bileşenlerinde cm düzeyinde farklılık olduğunu belirlemişlerdir. Bunun sebebinin TRAZ istasyonu çevresinde yeterli sıklıkta PS istasyonun olmayışı ve sismik aktiviteden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ise, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin etkisiyle deformasyon oluşan EKZ1 ve MAR1 istasyonlarında GPS ve InSAR verilerinden edilen düşey yer değiştirme vektörlerinin istatistiksel olarak benzer olup olmadıkları araştırılmıştır. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda EKZ1 istasyonunda elde edilen düşey deformasyon değerlerinin benzer olduğu, MAR1

istasyonunda ise uyumsuzluk olduğu belirlenmiştir. Bu durumda deprem bölgesini temsil eden bir jeodezik GPS ağından tutarlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2.'de çalışmanın teorik alt yapısı anlatılmıştır. Alt bölüm 2.1.'de jeodezik ağların Gauss-Markov modelinde değerlendirme ilkelerine değinilmiştir. Bununla birlikte bu bölümde yer değiştirme vektörünün düşey yöndeki bileşeni ve buna ait ortalama hata değerinin hesaplanma ilkeleri açıklanmıştır. Alt bölüm 2.2.'de InSAR tekniği hakkında bilgiler verilmiştir. Alt bölüm 2.3.'de farklı tekniklerden elde edilen düşey yöndeki yer değiştirme vektörleri arasındaki benzerlik testlerinin teorik yapısı anlatılmıştır. Alt bölüm 2.4.'de çalışma alanı ve kullanılan veri yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3.'de elde edilen sayısal bulgulara yer verilmiştir. Bölüm 4.'de ise elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Bu çalışmadan farklı olarak, [Küreç Nehbit \(2026\)](#)'da yaptığı çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenen bölgede, farklı sayıda TUSAGA-Aktif istasyonundan oluşan, epok oturumlu 3 farklı jeodezik GPS ağı kullanılarak deformasyon analizleri ve gerinim analizleri uygulanmıştır. 23, 26 ve 32 TUSAGA-Aktif istasyonundan oluşan 3 farklı jeodezik GPS ağında EKZ1 istasyonu için deformasyon büyüklüğü sırasıyla 466.71 cm, 467.17 cm ve 466.92 cm olarak elde edilmiştir. TUSAGA-Aktif istasyonları için kartezyen koordinat sisteminde hesaplanan deformasyon vektör bileşenleri ve bunlara ait ters ağırlık matrisleri kullanılarak üçgensel alanlarda deformasyon test değerleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte kartezyen koordinat sisteminde hesaplanan deformasyon vektör bileşenleri lokal koordinat sistemine dönüştürülerek üçgensel alanlarda 2B gerinim analizleri uygulanmıştır. Elde edilen gerinim matrisi elemanları kullanılarak üçgensel alanlarda maksimum kesme gerinim değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışma ile üçgensel alanlarda hesaplanan deformasyon test değerleri ve maksimum kesme gerinim değerlerinin dağılımları, çalışma bölgesinde oluşan deformasyonun yapısının net bir şekilde izlenebilmesine olanak sağlamıştır.

2. Yöntem

2.1. Jeodezik GPS Ağlarının Gauss-Markov Modelinde Değerlendirilmesi

Jeodezik ağlardan elde edilen gözlemler Gauss-Markov dengeleme modelinde En Küçük Kareler İlkesine göre tüm iz minimum koşulu altında serbest dengelenir. Dengeleme işlemi için kurulan matematik model, fonksiyonel ve stokastik model olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Fonksiyonel model:

$$\mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{l} \quad (1)$$

ve stokastik model:

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}, \mathbf{K}_{ll} = s_0^2 \mathbf{Q}_{ll} \quad (2)$$

$\mathbf{v}$ düzeltme vektörü, $\mathbf{A}$ katsayılar matrisi, $\mathbf{x}$ dengeleme bilinmeyenleri, $\mathbf{l}$ ölçüler vektörü, $\mathbf{P}$ ağırlık matrisi, $\mathbf{Q}_{ll}$ gözlemlerin ters ağırlık matrisi, $\mathbf{K}_{ll}$ varyans-kovaryans matrisi ve s_0 öncül standart sapma olmak üzere eşitlikleri ile elde edilmektedir. Bu eşitliklerden yararlanılarak koordinat bilinmeyenleri ($\mathbf{x}$):

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{PA})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Pl} \quad (3)$$

ve koordinat bilinmeyenlerine ait ters ağırlık matrisi ($\mathbf{Q}_{xx}$):

$$\mathbf{Q}_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{PA} + \mathbf{BB}^T)^{-1} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{BB}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} \end{bmatrix}_{ux3} \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{uxu} \quad (6)$$

$\mathbf{G}$ dönüşümün katsayılar matrisi, p ağdaki nokta sayısı, u koordinat bilinmeyen sayısı, $\mathbf{E}$ datum noktaları için “1” diğer noktalar için “0” olan matris ve $\mathbf{B} = \mathbf{EG}$ olmak üzere eşitlikleri kullanılarak elde edilmektedir (Öztürk & Şerbetçi, 1995; Koch, 1999). $\mathbf{E}$ matrisinin köşegen elemanlarının “1” seçilmesi durumunda tüm iz minimum koşulu altında serbest dengeleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Dengeleme işlemleri için oluşturulan matematik modelin geçerliliği model hipotez testleri ile incelenmektedir. Model hipotez testi ile öncül standart sapmanın (s_0^2) deneysel standart sapmayı (m_0^2) temsil edip etmediği araştırılır. Bunun için, sıfır hipotezi:

$$H_0: E\{s_0^2\} = E\{m_0^2\} \quad (7)$$

ve seçenek hipotezi:

$$H_5: E\{s_0^2\} \neq E\{m_0^2\} \quad (8)$$

eşitlikleri ile kurulmaktadır (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Koch, 1999). $T = \frac{s_0^2}{m_0^2} > F_{f_s, f_m, 1-\frac{\alpha}{2}}$ olması durumunda model hipotezinin α yanılma olasılığı ile geçersiz olduğu yorumu yapılabilmektedir ($F_{f_s, f_m, 1-\frac{\alpha}{2}}$ çift yönlü Fisher dağılım değerini temsil etmektedir. Buna göre f_s evrensel kümenin serbestlik derecesi, f_m dengeleme modelinin serbestlik derecesi olarak tanımlanmaktadır.). Dengeleme modelinin geçersiz olması uyumsuz ölçülerden veya matematik modelin ölçüleri yeterinde temsil etmemesinden kaynaklanabilmektedir (Şişman, 2021). Rasgele hatalara çok yakın kaba hataların belirlenmesi, diğer bir ifade ile uyumsuz ölçü testleri istatistiksel testlere dayanmaktadır. Bunun için her bir ölçü için hesaplanan test değeri (T_i):

$$T_i = \frac{|\mathbf{e}_i^T \mathbf{P} \mathbf{v}|}{m_0 \sqrt{\mathbf{e}_i^T \mathbf{P} \mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P} \mathbf{e}_i}} \quad (9)$$

$\mathbf{e}_i$ i. gözlem için “1” diğer gözlemler için “0” olan seçim vektörü ve $\mathbf{Q}_{vv}$ düzeltmelerin ters ağırlık matrisi olmak üzere, çift yönlü Tau dağılımının sınır değeri ($\tau_{f, 1-\frac{\alpha}{2}}=1.90$) ile karşılaştırılır. $T_i > \tau_{f, 1-\frac{\alpha}{2}}$ koşulunu sağlayan ölçünün f , serbestlik derecesi olmak üzere $\alpha = 0.05$ yanılma olasılığı ile uyumsuz olduğuna karar verilir (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Koch, 1999). Uyumsuz olarak belirlenen gözlemin ağırlığı Gauss robust ağırlıklandırma fonksiyonu (Koch, 1999) W_i :

$$W_i = e^{-\left(\frac{T_i}{\tau_{f, 1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{F}}\right)^2} \quad (10)$$

kullanılarak dengeleme içerisinde etkisi azaltılmaktadır (Küreç, 2010). $t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}}$ çift yönlü student dağılım değeri olarak tanımlanmaktadır ve $\alpha = 0.05$ seçilmiştir.

2.2. Statik Modelde Deformasyon Analizi

Farklı epoklarda ölçülüp değerlendirilen bir jeodezik ağda deformasyon oluşup oluşmadığı deformasyon analizleri ile belirlenmektedir. Deformasyon analizleri statik, kinematik ve dinamik modelde deformasyon analizleri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Atasoy, 1984). Statik modelde deformasyon analizinde, farklı zamanlarda yapılan gözlemlerden elde edilen dengeli koordinat değerleri ve bunlara ait ters ağırlık matrisi kullanılmaktadır.

Fakat farklı epoklarda elde edilen koordinatların doğrudan karşılaştırılabilmesi için S-Dönüşümü ile ortak bir ağırlık merkezine kaydırılmalıdır diğer bir ifade ile datum birliğinin sağlanması gerekmektedir. Buna göre S-dönüşüm matrisi:

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{B}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{B}^T \quad (11)$$

eşitlikleri ile elde edilir. S-dönüşüm matrisi kullanılarak dengeli koordinatlar ortak bir ağırlık merkezine getirilir. Buna göre datum birliği sağlanmış dengeli koordinat farkları ($\mathbf{d}$):

$$\mathbf{d} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{x}_i^{t_i} - \mathbf{S} \cdot \mathbf{x}_i^{t_0} \quad (12)$$

ve yer değiştirme vektörüne ait ters ağırlık matrisi ($\mathbf{Q}_{dd}$):

$$(\mathbf{Q}_{dd}) = \mathbf{S} \cdot (\mathbf{Q}_{xx}^{t_i} + \mathbf{Q}_{xx}^{t_0}) \cdot \mathbf{S}^T \quad (13)$$

elde edilir (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Yalçınkaya & Bayrak, 2005). Bu eşitlikte t_0 referans epoğu, t_i ise test epoğu olarak tanımlanmaktadır.

Yer değiştirme vektörü ve yer değiştirme vektörüne ait ters ağırlık matrisi istatistiksel analizlerde kullanılarak, bir jeodezik ağı temsil ettiği bölgede deformasyon oluşup oluşmadığı belirlenebilmektedir. Deformasyon analizlerinde uygulanan istatistiksel testler (i) global tutarlılık testi ve (ii) hareketli noktaların yerleştirilmesi olarak iki bölüme ayrılmaktadır. Global tutarlılık testi ile iki epok arasında istatistiksel olarak anlamlı bir hareketin oluşup oluşmadığı test edilmektedir. Global tutarlılık testinde ağı tamamı için geçerli olan θ^2 -ölçütü:

$$\theta^2 = R = (\mathbf{d}^T \mathbf{Q}_{dd}^{-1} \mathbf{d}) \quad (14)$$

R toplam aykırılık olmak üzere hesaplanmaktadır (Pelzer, 1971). Hesaplanan θ^2 -ölçütü kullanılarak, test değeri:

$$T = \frac{R}{m_0^2 h} \quad (15)$$

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{(\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})^{t_i} + (\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})^{t_0}}{f^{t_i} + f^{t_0}}} \quad (16)$$

$h = u - d$ rank sayısı, $f^{t_i} = 24$ test epoğuna ait serbestlik derecesi, $f^{t_0} = 24$ referans epoğuna ait serbestlik derecesi olmak üzere eşitlikleri ile elde edilmektedir (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Koch, 1999; Caspary, 2000). Hesaplanan test değeri, Fisher dağılım değeri ($F_{h,f,1-\alpha} = 1.96$) ile karşılaştırılır. Eğer test büyüklüğü Fisher dağılım değerinden büyükse $T > F_{h,f,1-\alpha}$ iki epok arasında anlamlı bir deformasyon meydana geldiği sonucuna ulaşılır (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Agnarsson & Dubois, 1993; Neumann & Kutterer, 2006).

Global tutarlılık testinin geçersiz olması durumunda, hareketli noktaların yerleştirilmesi ile hangi istasyonda ya da istasyonlarda deformasyon oluştuğu tespit edilebilmektedir. Hareketli noktaların yerleştirilmesi ile ilgili pek çok yöntem olmasına rağmen en büyük yer değiştirme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde göre jeodezik ağ noktaları hareketli ($\mathbf{d}_H$) ve sabit nokta ($\mathbf{d}_S$) kümesi olarak iki bölüme ayrılmaktadır (Agnarsson & Dubois, 1993). En büyük yer değiştirme yöntemine göre hareketli noktaların yerleştirilmesi işlem adımları aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.

a. Jeodezik ağı oluşturan her istasyon noktası için θ^2 - ölçütü:

$$R_i = (\mathbf{d}_i^T \mathbf{Q}_{dd}^{-1} \mathbf{d}_i) \quad (17)$$

hesaplanır.

b. Hesaplanan R_i değerlerinden en büyük olanı ($R_{max} = \max\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$) hareketli nokta olarak belirlenir ve hareketli nokta kümesine eklenir.

c. Sabit nokta kümesinde bulunan istasyonlara göre S-dönüşümü:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{I} - \mathbf{G}(\mathbf{B}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{B}^T \quad (18)$$

denklemini kullanılarak uygulanır. Burada k en büyük yer değiştirme yönteminde uygulanan iterasyon sayısını ifade etmektedir.

d. Sabit nokta kümesine göre uygulanan S-dönüşümü sonucunda elde edilen yer değiştirme vektörü ($\mathbf{d}_k$) ve yer değiştirme vektörüne ait ters ağırlık matrisi ($\mathbf{Q}_{dd}$)_k:

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{S}_k \cdot \mathbf{x}^{t_i} - \mathbf{S}_k \cdot \mathbf{x}^{t_0} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_S \\ \mathbf{d}_H \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$(\mathbf{Q}_{dd})_k = \mathbf{S}_k \cdot \mathbf{Q}_{dd} \cdot \mathbf{S}_k^T = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{SS} & \mathbf{Q}_{SH} \\ \mathbf{Q}_{HS} & \mathbf{Q}_{HH} \end{bmatrix} \quad (20)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

e. Sabit nokta kümesine göre global tutarlılık testleri tekrarlanır. Buna göre test değeri:

$$R_{kalan} = (\mathbf{d}_S^T \mathbf{Q}_{SS}^{-1} \mathbf{d}_S) \quad (21)$$

$$T_s = \frac{R_{kalan}}{m_0^2 h_s} \quad (22)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. $h_s = h - m$ sabit noktalar için hesaplanan rank sayısı, h ilk rank sayısı, m ise deformasyon tespit edilen nokta sayısını ifade etmektedir. $T_s > F_{h_s, f, 1-\alpha}$ olması durumunda iki epok arasında $\alpha=0.05$ yanlış olma olasılığı ile deformasyon oluştuğu yorumu yapılmaktadır (Öztürk vd. 2006, Agnarsson & Dubois 1993, Neumann & Kutterer 2006).

En büyük yer değiştirme yöntemine göre hareketli noktaların yerleştirilmesi işlem adımları global tutarlılık testi geçerli çıkana kadar devam ettirilmelidir (Öztürk vd., 2006; Agnarsson & Dubois, 1993; Neumann & Kutterer, 2006).

2.3. InSAR Tekniği

İnterferometrik sentetik açıklıklı radar (InSAR) tekniği jeodezik ve uzaktan algılama çalışmalarında kullanılan bir radar tekniğidir. Sentetik açıklıklı radar (SAR) ise radyo dalgalarını kullanan bir görüntüleme tekniğidir. SAR tekniğinde yansıyan dalgaların genlik ve faz bilgileri kullanılırken, InSAR tekniğinde sadece faz farkları kullanılmaktadır (Çakır, 2003). İnterferometri, dalga girişimine dayanan bir tekniktir. Bu teknik, bir yüzeyde oluşan deformasyonların belirlenmesinden, madencilik ve kentleşme çalışmaları gibi pek çok alanda kullanılabilir (Besoya vd., 2021). InSAR tekniği, radar elektromagnetik dalgalarla çalışır ve radyo dalgaları aracılığı ile mesafe ve konum belirlenmesinde kullanılır (Şireci, 2021). İnterferometri tekniğinin gelişimi ile birlikte PSInSAR ve DInSAR teknikleri deformasyon belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. DInSAR, bir bölgenin farklı zamanlarda elde edilen iki SAR görüntüsü arasındaki faz farkını belirleyerek, iki zaman arasında oluşan deformasyonların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Elde edilen bu faz farkı ($\Delta\varphi$):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{atmo} + \Delta\varphi_{orbit} + \Delta\varphi_{noise} \quad (23)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır (Yague-Martinez vd., 2016; Karaca & Erten, 2023). Buna göre bir bölgede, farklı zamanlarda elde edilen SAR görüntüleri arasındaki faz farklılıkları, topografik bilgilere $\Delta\varphi_{topo}$, yer değiştirmeye $\Delta\varphi_{def}$, atmosferik gecikmelere $\Delta\varphi_{atmo}$, yörünge hatalarına $\Delta\varphi_{orbit}$ ve gürültüye $\Delta\varphi_{noise}$ bağlıdır. Eşitlik (23) kullanılarak iki SAR görüntüsü arasındaki faz farklarından $\Delta\varphi$, yüzeyde meydana gelen deformasyonlar kestirilmektedir. DInSAR tekniğinde SLC (Single Look Complex) ya da raw veri seti kullanılmaktadır (Besoya vd., 2021). DInSAR kullanılarak deformasyonların elde edilmesi için izlenecek işlem adımları Şekil 1’de gösterilmiştir.

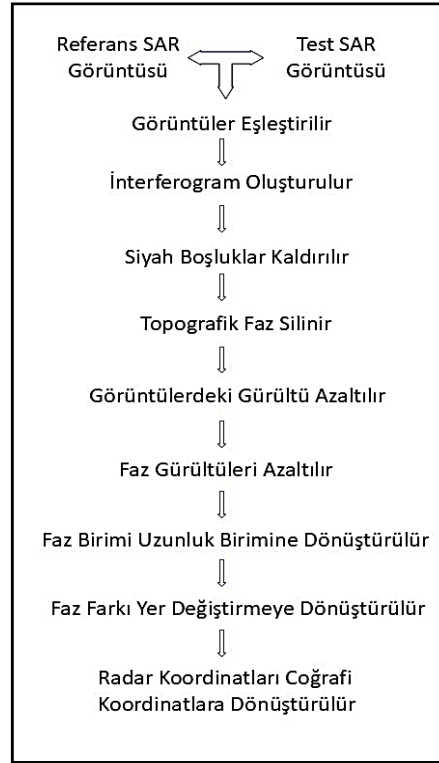
Aynı yüzey için farklı zamanlarda elde edilmiş iki SAR görüntüsü SNAP yazılımı içerisinde referans (master) ve test (slave) görüntü olarak seçilerek görüntülerin eşleştirme (coregistration) işlemi yapılmaktadır. Görüntü eşleştirme ile referans ve test görüntüsü olarak seçilen SAR görüntüleri hizalanmaktadır. Hizalanmış iki SAR görüntüsü kullanılarak interferogram oluşturulmaktadır. TOPSAR Deburst işlem adımı ile iki patlama (burst) arasındaki siyah boşluklar kaldırılmaktadır. Topo Phase Removal aşamasında siyah boşluklardan arındırılmış interferogramdan topografik faz tahmini yapılır ve interferogramdan çıkarılır. Topo Phase Removal aşamasında dijital yükseklik modeli kullanılmaktadır. Multilook aşaması ile görüntüdeki gürültüler azaltılarak kare şeklinde pikseller elde edilmektedir. Goldstein Phase Filtering işlem adımı ise faz gürültüleri azaltılmaktadır. Snapu Unwrapping (faz açılımı) işlem adımı ise faz birimi uzunluk birimine dönüştürülmektedir. Phase to Displacement aşamasında ise faz farkı yer değiştirmeye dönüştürülür. Son olarak Geocoding işlem adımı RADAR koordinatları coğrafi koordinatlara dönüştürülmektedir (European Space Agency, 2021). Bu işlem adımları sonucunda uydu bakış açısı yönündeki yer değiştirme vektörü Δp :

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta p} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\vec{B} \cdot \cos(\theta - \alpha)}{p \cdot \tan\theta} \quad (24)$$

$\vec{B}$ baz vektörü, θ bakış açısı, α eğim açısı, p uydudan yer yüzeyine kadar olan mesafe, λ radar dalgaboyu olmak üzere eşitliği ile elde edilmektedir (Goldstein vd., 1998). Uydu bakış açısı yönündeki yer değiştirme büyüklüğü (Δp) ve uydu bakış açısı (θ) kullanılarak düşey yönde yer değiştirme vektörü (du):

$$du = \frac{\Delta p}{\cos(\theta)} \quad (25)$$

eşitliği ile elde edilmektedir (Hanssen, 2001).



Şekil 1: DInSAR iş akış çizelgesi (Karaca & Erten, 2023)

Bir bölge için ulaşılabilecek görüntü sayısı kısıtlıysa ve düşey yer değiştirme vektörleri elde edilmek isteniyorsa DInSAR tekniği kullanılabilir. PSInSAR yöntemi ile, kalıcı saçıcılar (PS, persistent scatters) kullanılarak toplam faz farkı kestirilmektedir. PSInSAR tekniği, çalışma alanı için çok fazla görüntünün bulunması, yavaş hedef hareketi (slow target motion) ve yeterli sayıda PS istasyonunun olması durumunda kullanılacak bir yöntemdir (Besoya vd., 2021).

2.4. Farklı Tekniklerden Elde Edilen Deformasyonlar için Benzerlik Testi

Deformasyon analizleri ile belirlenen sabit nokta kümesine göre kısmi iz minimum koşulu altında deprem öncesinde ve deprem sonrasında elde edilen veriler yeniden değerlendirilerek deformasyon vektör bileşenleri elde edilebilmektedir. Kartezyen koordinat sisteminde elde edilen 3B yer değiştirme vektör bileşenleri:

$$\begin{bmatrix} dn \\ de \\ du \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\phi\cos\lambda & \cos\phi\sin\lambda & \sin\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$dn = -\sin\phi\cos\lambda dX - \sin\phi\sin\lambda dY + \cos\phi dZ \quad (27)$$

$$de = -\sin\lambda dX + \cos\lambda dY \quad (28)$$

$$du = \cos\phi\cos\lambda dX + \cos\phi\sin\lambda dY + \sin\phi dZ \quad (29)$$

eşitlikleri ile yerel koordinat sistemine dönüştürülür. i. istasyona ait yer değiştirme vektörünün düşey yöndeki bileşeninin (d_u) ortalama hatası (m_i^{GPS}):

$$d_u = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \quad (30)$$

$$d_u = f_x dx + f_y dy + f_z dz \quad (31)$$

$$\mathbf{f}_i = [0 \quad 0 \quad f_{x_i} \quad f_{y_i} \quad f_{z_i} \quad \cdots \quad 0] \quad (32)$$

$$qu_i = \mathbf{f}_i (\mathbf{Q}_{dd}) \mathbf{f}_i^T \quad (33)$$

$$m_i^{GPS} = \pm m_0 \sqrt{qu_i} \quad (34)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır (Öztürk & Şerbetçi, 1995).

Farklı tekniklerden elde edilen düşey yönlü deformasyon vektörlerinin istatistiksel olarak benzer olup olmadığının analiz edilmesi için sıfır hipotezi:

$$H_0: E\{d^{InSAR}\} = E\{d^{GPS}\} \quad (35)$$

ve seçenek hipotezi:

$$H_S: E\{d^{InSAR}\} \neq E\{d^{GPS}\} \quad (36)$$

oluşturulmaktadır (Koch, 1999).

Farklı iki teknikten elde edilen deformasyon büyüklükleri arasındaki fark vektörü:

$$d_{fark} = d^{InSAR} - d^{GPS} \quad (37)$$

ve i. istasyondaki fark vektörüne ait standart sapma (m_{fark}):

$$m_i^{InSAR} = \frac{m^{InSAR}}{\sqrt{n^{InSAR}}} \quad (38)$$

$$(m_{fark})_i = \pm \sqrt{(m_i^{GPS})^2 + (m_i^{InSAR})^2} \quad (39)$$

n^{InSAR} InSAR tekniğinde kullanılan piksel sayısı, m^{InSAR} InSAR tekniğinden elde edilen standart sapma, m_i^{InSAR} i. piksel için elde edilen standart sapma olmak üzere eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Öztürk & Şerbetçi, 1992). Elde edilen fark vektörü ve fark vektörüne ait standart sapma değeri kullanılarak test büyüklüğü T :

$$T = \frac{|d_{fark}|}{m_{fark}} \quad (40)$$

ve test büyüklüğünün sınır değeri q :

$$q = t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}} \quad (41)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Testin serbestlik derecesi f ise:

$$c = \frac{(m_i^{GPS})^2}{(m_i^{GPS})^2 + (m_i^{InSAR})^2} \quad (42)$$

$$f = \frac{1}{\frac{c^2}{n^{GPS}-1} + \frac{(1-c)^2}{n^{InSAR}-1}} \quad (43)$$

formülleri yardımıyla hesaplanır (Welch, 1938; Öztürk & Şerbetçi, 1992). $T > q$ olması durumunda iki farklı teknikten elde edilen yer değiştirme vektörleri arasında $\alpha=0.05$ yanlışla olasılığı ile anlamlı bir fark olduğu söylenebilir.

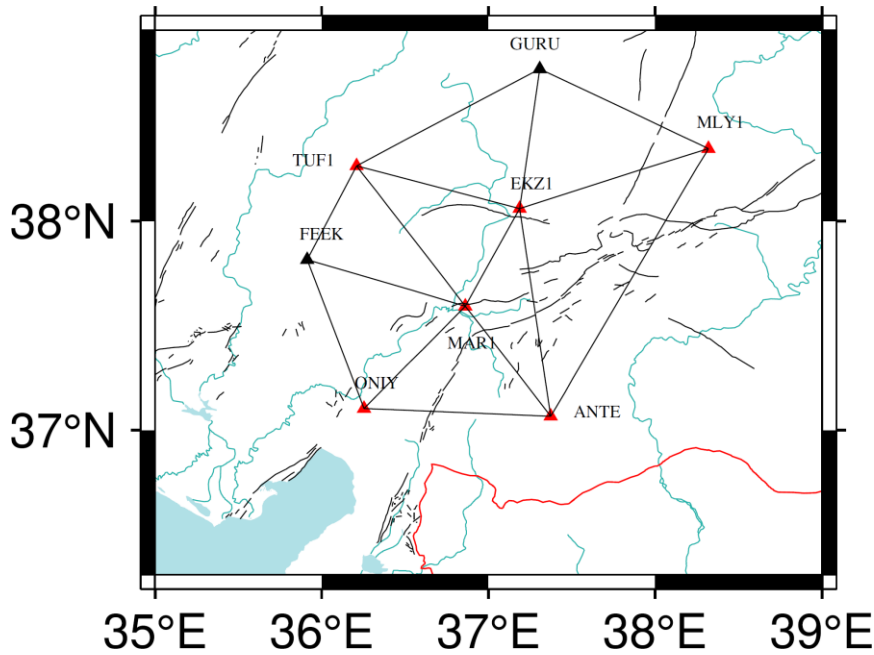
3. Çalışma Alanı ve Veri

Bu çalışmada 6 Şubat 2023 tarihinde saat 04:17 ve 13:24' de meydana gelen merkez üssü sırasıyla Pazarcık (Kahramanmaraş) ve Elbistan (Kahramanmaraş) olan Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüklerinde meydana gelen depremlerden etkilenen bölge çalışma alanı olarak seçilmiştir. InSAR tekniği ile yer değiştirme vektörlerinin elde edilmesi için çalışma alanını temsil eden 4 Şubat 2023 (Deprem Öncesi) ve 28 Şubat 2023 (Deprem Sonrası) tarihli Sentinel-1A uydu görüntüleri kullanılmıştır (Tablo 1). Elde edilen SAR görüntüleri açık erişim SNAP yazılım ile Şekil 1'de belirtilen aşamalara uygun olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1: Kullanılan SAR veri yapısı.

Tarih	Tür	İz	Yörünge	Veri Türü
4 Şubat 2023	Ascending	116	47088	SLC
28 Şubat 2023	Ascending	116	47438	SLC

Çalışma alanında, depremlerin etkisi ile oluşan yer değiştirme vektörlerinin elde edilmesi için TUF1, FEEK, ONIY, MAR1, EKZ1, ANTE, MLY1 ve GURU TUSAGA-Aktif istasyonlarından oluşan bir jeodezik ağ tasarlanmıştır (Şekil 2). TUSAGA-Aktif istasyonlarına ait deprem öncesi için 1-2-3 Ocak 2023 ve deprem sonrası için 17-28 Şubat 2023 tarih aralığındaki 30 sn'lik rinex verileri kullanılmıştır (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü & Harita Genel Müdürlüğü, t.y.). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin ardından çok sayıda artçı deprem meydana gelmiştir. Bunlar arasında 20 Şubat 2023 tarihinde Mw 6.4 büyüklüğünde Hatay'da Antakya Fay Zonu üzerinde meydana gelen artçı deprem hakkında günümüzde halen tartışmalar devam etmektedir. 20 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen bu depremi araştırmacıların bir bölümü Mw 7.7 Pazarcık depreminden sonra meydana gelen bir artçı deprem olarak düşünmektedir (Stein vd. 2023; Utkucu vd., 2023; Yolsal-Çevikbilen vd., 2024). 6 Şubat 2023'te yaşanan depremler sırasında Hatay'da bulunan TUSAGA-Aktif istasyonu tahrip olmuştur, bu nedenle jeodezik ağ planına dahil edilmemiştir.



Şekil 2: Jeodezik GPS Ağı (kırmızı üçgen: deformasyon tespit edilen TUSAGA-Aktif İstasyonları, siyah üçgen: kısmi iz minimum koşuluna göre datum alınan TUSAGA-Aktif istasyonları)

Şekil 2'de belirlenen gözlem planına göre rinex verileri Topcon-tools yazılımı kullanılarak öncül olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme işlemi sonucunda gözlem planına göre belirlenen baz bileşenleri ile baz bileşenlerine ait standart sapma ve korelasyon bilgileri elde edilmiştir. Deprem öncesi ve deprem sonrasında elde edilen bu bilgilerin bivaryat dengeleme modeline göre dengelenmesi sırasında yaklaşık koordinatlar sabit tutulmuştur. Yaklaşık koordinatlar, GURU istasyonunun ITRF96 referans sisteminde 2005.00 epöğünde verilen koordinatları ve deprem öncesi elde edilen baz bileşenleri kullanılarak ölçü epöğünde hesaplanmıştır. Dengeleme işlemi ve deformasyon analizi C++ programlama dilinde geliştirilen yazılım ile yapılmıştır (Küreç Nehbit, 2018). Bununla birlikte harita çizimleri açık erişim GMT 6.5 (Wessel vd., 2019) yazılımı ile yapılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında oluşturulan jeodezik GPS ağına ait deprem öncesi ve deprem sonrası verileri Gauss-Markov modelinde tüm iz minimum koşulunda serbest dengelenmiştir. Dengeleme işlemi sonrasında model hipotez testi ve uyumsuz ölçü testi uygulanmıştır. Deprem öncesi için FEEK-ONIY bazı uyumsuz olarak belirlenirken, deprem sonrası verileri için uyumsuz ölçü tespit edilememiştir. Uyumsuz olarak belirlenen gözlemin ağırlığı robust ağırlıklandırma fonksiyonu ile düşürülerek gözlemin dengeleme modeline etkisi azaltılmıştır. Dengeli koordinatlar ve koordinat bilinmeyenlerine ait ters ağırlık matrisi S-dönüşümü ile ortak bir ağırlık merkezine getirilmiştir. Ortak bir ağırlık merkezine dönüştürülmüş dengeli koordinatlar ve ters ağırlık matrisleri kullanılarak statik modelde deformasyon

analizi uygulanmış ve bunun sonucunda TUF1, EKZ1, MAR1, MLY1, ANTE ve ONIY istasyonlarında deformasyon olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada deformasyon analizleri sonuçlarına göre FEEK ve GURU istasyonları sabit kabul edilerek datum noktası olarak belirlenmiştir. Bu bilgilerden yararlanarak GURU ve FEEK istasyonlarına göre kısmi iz minimum koşulu uygulanarak dengeleme işlemi yinelenmiş ve kartezyen koordinat sisteminde deformasyon vektörleri elde edilmiştir. Bu çalışmada oluşturulan jeodezik GPS ağı, klasik bir jeodezik deformasyon ağı olarak oluşturulmamıştır. Bu nedenle deformasyon analizi sonucunda elde edilen sabit nokta kümesine göre ölçüler kısmi iz minimum koşulu altında serbest dengelenmiştir. Kartezyen koordinat sisteminde hesaplanan deformasyon vektör bileşenleri Denklem (26) kullanılarak yerel koordinat sistemine dönüştürülmüştür (Tablo 2). Bu çalışmada 8 TUSAGA-Aktif istasyonu kullanılarak en büyük deformasyon büyüklüğü EKZ1 istasyonunda 457.42 cm olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada deprem öncesi ve deprem sonrasında değerlendirilen jeodezik ağda gözlem planı, istasyon noktalarının yeri ve sayısı sabit alınmıştır. Bu nedenle, 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sırasında tahrip olan ve Hatay'da bulunan TUSAGA-Aktif istasyonu çalışmaya dahil edilmemiştir. Özkan vd. (2023)'de 73 sabit GNSS istasyonu ve 40 kampanya gözlem noktası kullanılarak en büyük deformasyon büyüklüğü 466 cm olarak EKZ1 istasyonunda elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda EKZ1 istasyonu için elde edilen deformasyon büyüklüğünün farklı olmasının nedeni jeodezik ağ noktalarının seçiminden ve datum noktalarının farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

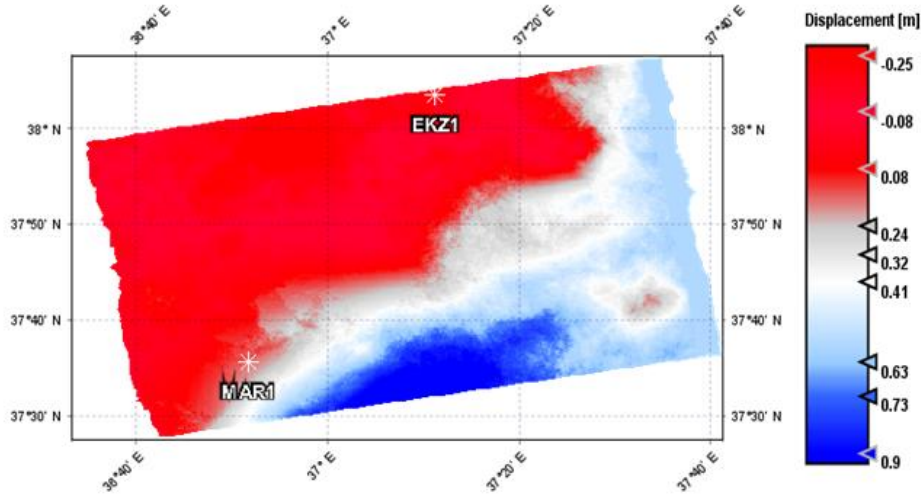
Bununla birlikte çalışma alanı için kullanılan 4 Şubat 2023 (deprem öncesi) ve 28 Şubat 2023 (deprem sonrası) tarihli Sentinel-1A uydu görüntüleri SNAP açık erişim yazılım ile değerlendirilmiştir. Değerlendirme aşamasında VV polarizasyonu kullanılmıştır. Ön değerlendirme işleminde polinom derecesi 3 seçilerek kesin yörünge dosyaları uygulanmıştır. Görüntü eşleştirilmesi (coregistration) sırasında uyduların kesin konum ve hız bilgisini içeren güncellenmiş yörünge dosyaları kullanılmıştır. İnterferogram oluşturulurken tutarlılık kestirimi (coherence estimation) uygulanmış olup, tutarlılık aralık pencere genişliği (coherence range window size) 18 olarak seçilmiştir. Aykırı değerlerin kaldırılması için tutarlılık eşik değeri 0.15 olarak seçilmiştir. Faz filtreleme işlem adımı ile multilook ve goldstein phase filtering sekmeleri kullanılarak faz açılımının (phase unwrapping) doğruluğu artırılmıştır. Bununla birlikte dijital yükseklik modeli için 30 m çözünürlüklü SRTM 1sec HGT seçilmiş, dijital yükseklik modeli örnekleme yöntemi olarak bilinear enterpolasyon ve WGS84 harita projeksiyonu uygulanmıştır. Değerlendirilen SAR görüntüleri ile çıkan EKZ1 ve MAR1 TUSAGA-Aktif istasyonları yapılacak istatistiksel analizler için seçilmiştir. EKZ1 ve MAR1 istasyonlarına denk gelen piksellerde uydu bakış açısı yönünde sırasıyla -13.51 cm ve 5.32 cm yer değiştirme elde edilmiştir (Şekil 3).

Uydu bakış açısı yönündeki deformasyon vektörleri ile EKZ1 ve MAR1 istasyonlarının bulunduğu piksellere ait geliş açıları (incidence angle, θ) kullanılarak deformasyon vektörlerinin düşey bileşenleri (du) hesaplanmıştır. Buna göre EKZ1 ve MAR1 istasyonlarında düşey yer değiştirme vektörleri sırasıyla -16.20 cm ve 5.95 cm olarak elde edilmiştir. InSAR ve jeodezik GPS ağları kullanılarak elde edilen yer değiştirme vektörlerinin düşey bileşenleri arasında anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel testlerle analiz edilmiştir.

Buna göre her iki teknikten elde edilen yer değiştirme vektörünün düşey bileşeni arasında MAR1 istasyonunda anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir (Tablo 3). Elde edilen bu farklılık, InSAR tekniğinde kullanılan sayısal yükseklik modelinden, atmosferik koşullardan ve uydu yörünge bilgilerinden kaynaklanabileceği gibi (Şengün, 2010), oluşturulan jeodezik GPS ağının deformasyonları belirleyebilme kapasitesinden de oluşabilir. Bu nedenle farklı GPS ağ modelleri kullanılarak deformasyon vektör bileşenlerinin karşılaştırılması gerekli görülmektedir. Poyraz ve Hastaoğlu (2020)'de yaptıkları çalışmada uydu bakış açısı yönünde PSInSAR ve GNSS tekniklerinden elde edilen hız bilgilerinin 0.987 korelasyon değerine sahip olduğu elde edilmiştir. Bunun sonucunda da PSInSAR ve GNSS tekniklerinden elde edilen uydu bakış açısı yönündeki hız bilgilerinin birbirleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan çalışmada kullanılan TRAZ istasyonunda GNSS ve PSInSAR yöntemlerinden elde edilen hız bilgilerinin birbirleri ile uyumsuz olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 2: Kartezyen koordinat sisteminde (dx , dy , dz) ve yerel koordinat sisteminde (dn , de , du) elde edilen deformasyon vektör bileşenleri.

NN	dx (cm)	dy (cm)	dz (cm)	dn (cm)	de (cm)	du (cm)
ANTE	-40.858	20.775	26.851	33.32	41.31	0.38
EKZ1	238.086	-389.356	30.813	52.410	-454.090	-16.958
FEEK	-3.930	3.090	5.819	5.437	4.808	2.485
GURU	3.930	-3.090	-5.819	-5.324	-4.840	-2.662
MAR1	37.134	-33.256	-8.945	-13.042	-48.884	2.278
MLY1	43.916	-1.145	-51.166	-61.064	-28.128	-5.274
ONIY	20.299	5.708	-10.127	-19.988	-7.401	9.638
TUF1	-1.707	-28.985	11.213	20.259	-22.379	-7.582



Şekil 3: InSAR Yöntemi ile elde edilen uydu bakış açısı yönündeki düşey deformasyon haritası

Tablo 3: InSAR ve jeodezik GPS ağlar kullanılarak elde edilen düşey yer değiştirme vektör bileşenlerinin test edilmesi.

NN	InSAR yöntemi du (cm)	GPS Yöntemi du (cm)	d _{fark} (cm)	T	q	Karar
EKZ1	-16.20	-16.96	0.80	1.93	2.36	Uyşumlu
MAR1	5.95	2.28	3.67	9.06	2.36	Uyşumsuz

5. Sonuç

Bu çalışmanın sonucunda, 8 TUSAGA-Aktif istasyonu kullanılarak oluşturulan jeodezik GPS ağında en büyük deformasyon EKZ1 istasyonunda yerel koordinat sisteminde (dn, de, du) sırasıyla 52.410 cm, -454.090 cm ve -16.958 cm olarak hesaplanmıştır. EKZ1 istasyonunda deformasyon büyüklüğü ise 457.42 cm olarak elde edilmiştir. Deformasyon vektör büyüklükleri, deformasyon analizlerinde sabit noktalara göre uygulanan S-Dönüşümünden etkilenmektedir. Bu nedenle kullanılan deformasyon modelleri ve bu modellerin deformasyonları belirleyebilme kapasiteleri deformasyon büyüklüklerinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. [Konakoglu \(2021\)](#)'deki çalışmada su seviyesi değişimlerinin baraj deformasyonlarına etkisinin belirlenmesinde dinamik deformasyon modelinin geçerliliği araştırılmıştır. [Bulbul vd. \(2023\)](#)'de yapmış olduğu çalışmada 22 CORS-TR istasyonu kullanarak deformasyon vektör büyüklüklerini hesaplamıştır. Çalışma sonucunda en büyük yer değiştirmenin EKZ1 istasyonunda olduğu tespit edilirken, 22 CORS-TR istasyonunda hesaplanan deformasyon büyüklükleri 4.20 cm ile 4.67 m aralığında elde edilmiştir. Buna göre oluşturulan jeodezik ağlarda kullanılan istasyon sayısının deformasyon vektör büyüklükleri üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte InSAR tekniğinde EKZ1 istasyonu için düşey yönde -16.20 cm yer değiştirme elde edilmiştir. Çalışma alanını kapsayan bölgede InSAR tekniği ile uydu bakış açısı yönünde -0.25 m ile 0.90 m arasında deformasyon tespit edilmiştir. InSAR ve GPS tekniklerinden elde edilen deformasyon vektör bileşenleri arasında, anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel testlerle analiz edilmelidir. Bununla birlikte deformasyonları izlemek için oluşturulan jeodezik GPS ağlarının, deformasyonları algılayabilme kapasiteleri de analiz edilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Desteği Programı 1919B012400572 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Çalışmada kullanılan TUSAGA-Aktif verileri için Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Agnarsson, M., & Dubois, T. (1993). *Deformation analysis of the puriscal landslide*, Trita/Geod-93/3030. [Master of Science Thesis, Royal Institute Technology Department of Geodesy and Photogrammetry] <http://cidbimena.bvs.hn/docum/crid/Septiembre2004/pdf/eng/doc6192/doc6192-e.pdf>.
- Atasoy, V. (1984). *Jeodezik deformasyon ölçülerinin irdelenmesi*. [Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi].
- Besoya, M., Govil, H., & Bhaumik, P. (2021). A review on surface deformation evaluation using multitemporal SAR interferometry techniques. *Spatial Information Research*, 29, 267–280. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00344-8>
- Bulbul, S., Gundogan, T., Inal, C., Bascifci, F., & Yildirim, O. (2023). Monitoring deformations caused by Pazarcık (Mw = 7.7) and Ekinözü (Mw = 7.6) earthquakes in Kahramanmaraş on 6 February 2023 with GNSS. *The European Physical Journal Plus*, 138, 1110. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04759-8>
- Caspary, W. F. (2000). *Concepts of network and deformation analysis*, Edited by J.M. Rüeger, Third (corrected) Impression, Monograph 11. Sydney: Scholl of Geomatic Engineering, The University of New South Wales.
- Çakır, Z. (2003). *Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 İzmit and Düzce earthquakes using synthetic aperture radar interferometry*. [Doctoral Thesis, Istanbul Technical University].
- Çetin, E. (2010). *1 Ekim 1995 Dinar depremi faylanma parametrelerinin InSAR ve sismoloji verileriyle belirlenmesi*. (Yayın No. 266236) [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Ergintav, S., Vernant, P., Tan, O., Karabulut, H., Özpapacı, S., Floyd, M., Konca, Ö., Çakır, Z., Acarel, D., Çakmak, R., Vasyura-Bathke, H., Doğan, U., Kurt, A.İ., Özdemir, A., Ayruk, E.T., Turğut, M., Özel, Ö., & Farımaç, İ. (2024). Unexpected far-field deformation of the 2023 Kahramanmaraş earthquakes revealed by space geodesy. *Science*, 386(6719), 328-335. <https://doi.org/10.1126/science.ad04220>.
- European Space Agency. (2021). Copernicus RUS training materials. Retrieved June 14, 2024, from <https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials/>
- Goldberg, D. E., Taymaz, T., Reitman, N.G., Hatem, A. E., Yolsal-Cevikbilen, S., Barnhart, W. D., Irmak, T. S., Wald, D. J., Ocalan, T., Yeck, W. L., Ozkan, B., Jobe, J. A., Shelly, D. R., Thompson, E. M., DuRoss, C., Earle, P. S., Briggs, R. W., Benz, H. M., Erman, C., ... & Altuntas, C. (2023). Rapid characterization of the February 2023 Kahramanmaraş, Turkey, earthquake sequence. *The Seismic Record*, 3(2), 156-167, <https://doi.org/10.1785/0320230009>.
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038.
- Gül, Y., Poyraz, B., & Poyraz, F. (2024). Comparison of the monitoring of surface deformations in open-pit mines with Sentinel-1A and TerraSAR-X satellite radar data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 581. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12717-9>.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis* (Vol. 2). Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- He, L., Feng, G., Xu, W., Wang, Y., Xiong, Z., Gao, H., & Liu, X. (2023). Coseismic kinematics of the 2023 Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence from InSAR and optical data. *Geophysical Research Letters*, 50. <https://doi.org/10.1029/2023GL104693>.
- Helz, R. L. (2005). Monitoring ground deformation from space. US department of the interior, *US Geological Survey*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2005/3025/2005-3025.pdf>
- Jia, Z., Jin, Z., Marchandon, M., Ulrich, T., Gabriel, A. A., Fan, W., Sheaper, P., Zou, X., Rekoske, J., Bulut, F., Garagon, A., & Fialko, Y. (2023). The complex dynamics of the 2023 Kahramanmaraş, Turkey, M w 7.8-7.7 earthquake doublet. *Science*, 381(6661), 985-990.
- Karaca, Ş. O., & Erten, G. (2023). Coseismic DInSAR analysis and elastic dislocation modelling of the 24 January 2020 Elazığ-Sivrice earthquake. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 5(1), 01-13.
- Kobayashi, T., Munekane, H., Kuwahara, M., & Furui, H. (2024). Insights on the 2023 Kahramanmaraş earthquake, Turkey, from InSAR: fault locations, rupture styles and induced deformation. *Geophysical Journal International*, 236(2), 1068–1088, <https://doi.org/10.1093/gji/ggad464>.
- Koch, R. (1999). *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models* (2nd edn) Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Konakoglu, B. (2021). Deformation analysis using static, kinematic and dynamic geodetic deformation models with GNSS: Deriner Dam, Artvin, Turkey. *Experimental Techniques*, 45, 645–660. <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00435-z>
- Küreç, P. (2010). *Yüzey ağlarının değerlendirilmesi*. (Yayın No. 275768) [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Küreç Nehbit, P. (2018). *GPS/GNSS ağları için sürekli bir gerinim izleme ve kalite değerlendirme stratejisi*. (Yayın No. 526668) [Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Küreç Nehbit, P. (2026). Comparison of the shear strain and the deformation test value obtained for the triangular areas affected by Kahramanmaraş earthquakes with a magnitude of Mw 7.7 and Mw 7.6 with the different GNSS networks. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 24(6), 3447-3463. <https://doi.org/10.1007/s10518-026-02404-0>
- Melgar, D., Taymaz, T., Ganas, A., Crowell, B., Öcalan, T., Kahraman, M., Tsironi, V., Yolsal-Cevikbilen, S., Valkaniotis, S., Irmak, T. S., Eken, T., Erman, C., Özkan, B., Dogan, A. H., & Altuntaş, C. (2023). Sub- and super-shear ruptures during the 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 earthquake doublet in SE Türkiye. *Seismica*, 2(3). <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.387>
- Neumann, I., & Kutterer, H. (2006, 22-24 May). *Congruence tests and outlier detection in deformation analysis with respect to observation imprecision*, 3rd IAG. In: 12th FIG Symposium, Baden.
- Okuwaki, R., Yagi, Y., Taymaz, T., & Hicks, S. P. (2023). Multi-scale rupture growth with alternating directions in a complex fault network during the 2023 south-eastern Türkiye and Syria earthquake doublet. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103480. <https://doi.org/10.1029/2023GL103480>.
- Özkan, A., Solak, H. İ., Tiryakioğlu, İ., Şentürk, M. D., Aktuğ, B., Gezgin, C., Poyraz, F., Duman, H., Masson, F., Uslular, G., Yiğit, C. Ö., & Yavaşoğlu, H. H. (2023). Characterization of the co-seismic pattern and slip distribution of the February 06, 2023,

- Kahramanmaraş (Turkey) earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) with a dense GNSS network. *Tectonophysics*, 866, 230041, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230041>.
- Öztürk, E., Konak, H., & Atasoy, V. (2006). Deprem bölgelerinde yer kabuğu hareketlerinin izlenmesi, *Harita Dergisi*, 155, 52-63.
- Öztürk, E., & Şerbetçi, M. (1992). *Dengeleme hesabı cilt III* (144/40). Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Öztürk, E., & Şerbetçi, M. (1995). *Dengeleme hesabı cilt II* (2. Baskı) Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi Yayınları.
- Pelzer, H. (1971) *Zur Analyse geodätischer deformationsmessungen*. Nr. 164, München, DGK.
- Pleterski, Ž., Ambrožič, T., Mulahusić, A., Tuno, N., Topoljak, J., Hajdar, A., Hamzić, A., Đidelića, M., Kulo, N., Rak, G., Marjetič, A., & Kregar, K. (2025). Squared Msplit estimation in deformation analysis—2D geodetic network case study. *Geodetski Vestnik*, 69(2), 115-147. <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2025.02.115-147>
- Poyraz, F., & Hastaoğlu, K.Ö. (2020). Monitoring of tectonic movements of the Gediz Graben by the PSInSAR method and validation with GNSS results. *Arabian Journal of Geoscience*, 13, 844. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05834-5>
- Sakkas, V. (2021). Ground deformation modelling of the 2020 Mw6.9 Samos earthquake (Greece) based on InSAR and GNSS data. *Remote Sensing*, 13(9), 1665. <https://doi.org/10.3390/rs13091665>.
- Solak, H.İ., Gezgın, C., Kılınç, A. S., Tiryakioğlu, İ., Baybura, T., Aladoğan, K., & Çakanşimşek, E., B. (2025). Kahramanmaraş deprem dizisinin Erzurum ve çevresinde meydana getirdiği kosismik deformasyonlar ve bölgenin sismik parametre analizi. *Geomatik*, 10(3), 375-392. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1652700>.
- Stein, R., S., Toda, S., Özbakır, A. D., Sevilgen, V., Gonzalez-Huizar, H., Lotto, G., & Sevilgen, S. (2023). Interactions, stress changes, mysteries, and partial forecasts of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquakes, *Temblor*, <http://doi.org/10.32858/temblor.299>.
- Şengün, Y.S. (2010). InSAR ölçülerinin doğruluk Araştırması, *Harita Dergisi*, 143, 19-25.
- Şireci, N. (2021). Konya şehir alanı yüzey deformasyonlarının InSAR yöntemiyle incelenmesi. Tez No: 684529 [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Şişman, Y. (2021). *Çözümlü örneklerle dengeleme hesabı*, (Sayı: 1) Konya: Atlas Akademi yayınları.
- Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü & Harita Genel Müdürlüğü. (t.y.). TUSAGA-Aktif. 17 Şubat 2025'te <https://www.tusaga-aktif.gov.tr/> adresinden alındı.
- Utkucu, M., Uzunca, F., Durmuş, H., Nalbant, S., & Sert, S. (2023). The Pazarcık (Mw=7.8 and Elbistan (Mw=7.6) Kahramanmaraş earthquakes in the southeast Türkiye [Technical Report, Sakarya University Disaster Management Application and Research Center and Department of Geophysics].
- Welch, B. L. (1938). The significance of the difference between two means when the population variances are unequal, *Biometrika*, 29(3/4), 350–62. <https://doi.org/10.2307/2332010>.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The generic mapping tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(11), 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.
- Yague-Martinez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), 2220–2234.
- Yalçınkaya, M., & Bayrak, T. (2005). Comparison of static, kinematic and dynamic geodetic deformation models for Kutlugün landslide in northeastern Turkey. *Natural Hazards*, 34, 91-110.
- Yolsal-Çevikbilen, S., Taymaz, T., Irmak, T. S., Erman, C., Kahraman, M., Özkan, B., Eken, T., Öcalan, T., Doğan, A.H., & Altuntaş, C. (2024). Source geometry and rupture characteristics of the 20 February 2023 Mw 6.4 Hatay (Türkiye) earthquake at southwest edge of the East Anatolian Fault. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25, e2023GC011353. <https://doi.org/10.1029/2023GC011353>.