



6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonucunda Oluşan Yüzey Deformasyonunun Radar Uydu Verileri Aracılığıyla İnterferogram Analizi

Interferogram Analysis of Surface Deformation Resulting from the February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes Using Radar Satellite Data

Ahmet Yıldırım^{1*}

¹ Dicle Üniversitesi, Türkçe ve Sosyal Bilimler Bölümü, ahmetyildirim21@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5371-3030>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Ocak 2026
Revizyon 16 Şubat 2026
Kabul 16 Şubat 2026
Online 27 Mart 2026

Anahtar Kelimeler:

6 Şubat Kahramanmaraş depremleri, Yüzey deformasyonları, Uydu Tabanlı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verileri, İnterferogram (InSAR)

ÖZ

6 Şubat 2023'te Türkiye'nin güneydoğusunda ve Doğu Akdeniz'de DAFZ ve ÖDFZ ile ilişkili Mw 7.8 (Pazarcık), Mw 7.6 (Elbistan) ve 20 Şubat 2023'te ise Mw 6.4 (Hatay) depremleri meydana gelmiştir. Depremlerden 11 ilde yaklaşık 15 milyon kişi etkilendi etkilendirilmiştir. Söz konusu depremlerle ilgili farklı bilim disiplinlerince çok sayıda araştırma ve çalışma yapılmıştır. Bu çalışma, deprem sonrası yüzey deformasyonlarını InSAR teknikleriyle belirlemeyi ve sismik risk analizine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu araştırmanın odağı, depremler sonrasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının mekânsal ve zamansal olarak doğru biçimde belirlenmesidir. Sismik olarak isimlendirilen deprem kaynaklı deformasyonlar, bir bölgenin hem paleosismik tarihçesini aydınlatmaya hem de o bölgede gelecekte olabilecek deprem büyüklükleri hakkında önemli ip uçları verebilmektedir. Bu çalışmada, Uydu Tabanlı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verilerine dayanarak radar interferometrisi (InSAR) teknikleri kullanılarak, yer yüzeyindeki deformasyonların geniş alanlardaki sonucu izlenmiştir.

Elde edilen Interferogram görseli ve bulguları fay hatlarında maksimum yaklaşık 2.22 m (Line of Sight veya Görüş Hattı) LOS yer değiştirmesi göstermektedir (aralık-0.13 m çökme ile +2.22 m yükselme). Kahramanmaraş merkezli alan (Pazarcık, Elbistan vb.) deformasyonunu, alüvyon dolgu ve basen etkisiyle ilişkilendirmek mümkündür. Elde edilen veriler, deprem dizisinin mekânsal tahribatını ve enerji boşalmasını somutlaştırarak, imar planlaması, risk azaltma ve afet yönetimi için-önemli veri katmanları olarak kullanmak mümkündür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 January 2026
Received in revised form 16 February 2026
Accepted 16 February 2026
Available online 27 Mart 2026

Keywords:

February 6 Kahramanmaraş earthquakes, Surface deformations, Satellite-Based Synthetic Aperture Radar (SAR) data, Interferogram (InSAR) image

ABSTRACT

On February 6, 2023, Mw 7.8 (Pazarcık), Mw 7.6 (Elbistan) earthquakes associated with DAFZ and ÖDFZ occurred in southeastern Turkey and the Eastern Mediterranean, and on February 20, 2023, the Mw 6.4 (Hatay) earthquake; approximately 15 million people in 11 provinces were affected by the earthquakes. Numerous research and studies have been conducted by different scientific disciplines regarding the mentioned earthquakes. This study aims to determine post-earthquake surface deformations using InSAR techniques and to contribute to seismic risk analysis.

The focus of this research is to accurately determine the spatial and temporal surface deformations that occurred after the earthquakes. Earthquake-induced deformations, called seismites, can illuminate a region's paleoseismic history and provide important clues about the magnitudes of future earthquakes in that region. In this study, based on Satellite-Based Synthetic Aperture Radar (SAR) data, radar interferometry (InSAR) techniques were used to monitor the results of surface deformations over wide areas.

The obtained Interferogram visuals and findings show a maximum of approximately 2.22 m LOS displacement along the fault lines (range from -0.13 m subsidence to +2.22 m uplift). It is possible to associate the deformation in the Kahramanmaraş-centered area (Pazarcık, Elbistan, etc.) with alluvial fill and basin effects. The obtained data can be used as critical data layers for urban planning, risk reduction, and disaster management by concretizing the spatial destruction and energy release of the earthquake sequence.

Doi: 10.24012/dumf.1872080

* Sorumlu Yazar

Giriş

6 Şubat 2023'te Türkiye'nin güneydoğusunda, Kahramanmaraş'a bağlı Pazarcık ve Elbistan ilçe sınırlarında 9 saat arayla iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremler, şimdiye kadar Türkiye'de kaydedilen en büyük 2. ve 3. depremlerdir. Bu depremleri takip eden 10 gün içinde (09-16 Şubat 2023) Karasu Grabeni olarak adlandırılan tektonik olukta 3000'e yakın artçı deprem meydana gelmiştir. 20 Şubat 2023'te meydana gelen Mw 6.4 büyüklüğündeki Hatay depremi ise Samandağ başta olmak üzere Hatay genelinde yıkıcı etkilere yol açmıştır [1].

6 Şubat 2023'te önce 04:17'de Pazarcık'ta Mw 7.8 büyüklüğünde vukuu bulan deprem, Kahramanmaraş-Antakya tektonik oluğunda fayların hareketi ile meydana gelmiştir. Bu tektonik oluğun kalın alüvyon depolarından meydana gelmesi, bu alüvyal yapıların deprem dalgalarını büyütürken yerleşim yerlerindeki binalara iletmesi, buralarda yıkımların büyük olması sonucunu doğurmuştur. Deprem merkezinden yaklaşık 150 km uzaklıktaki Antakya'da depremin yıkıcı etki göstermesi, bu kalın alüvyal dolguların bu kente kadar sürekli devam etmesi ile açıklanabilir. Söz konusu depremlerde dikkat çekilmesi gereken konu sadece tektonik olaylar, hatlar ve etkileri değil, bunların diğer yeryüzü süreçleri ile birlikte oluşturdukları jeomorfolojik koşullardır. Bu durumda depremin etkisinin yaygın olduğu bölgedeki basen (havza) etkilerinden ve zemin büyütmesinden bahsetmek gerekir [2].

1.1. Yüzey Deformasyonu

Seilacher [3], Sismik sebeplerle oluşmuş deformasyon yüzeyleri için "sismik" terimini kullanmıştır. "Sismik" terimi, deformasyon yüzeylerinin faylanmaya bağlı dizilişleri için önerilmiştir.

Yapıların dizilişlerinde bozulmamış çökellerden sıvılaşmış, homojenleşmiş çökellere kadar bir sıra yer alır. Bu tür bir sıralanma California'daki Miyosen yaşlı Monterey Şeylleri'nde gelişmiştir [3].

Depreme bağlı gelişen deformasyon yüzeyleri çoğunlukla çökellerin sıvılaşması ile oluşur. Deprem anında sismik dalgalar, suya doymuş kumlu, özellikle de siltli yapılarda ilerlerken, birbirine etki eden makaslama kuvvetlerinin açığa çıkmasına sebep olarak zemin tanelerinin yer değiştirmesinin sonucunu doğururlar. Bunun sonucunda gevşek olan kum taneleri birbirlerine yaklaşır. Buna bağlı olarak taneler arasında oluşan gerilim, taneleri çevresindeki suya aktarılır.

Depremler, kum taneleri arasındaki sıvı kaçışına imkân tanımayacak kadar ani-hızlı gelişen yer kabuğu kırılmaları ve hareketleridir. Bu yüzden kum taneleri arasından kaçamayan bu suların basıncında hızlı bir artış gerçekleşir. Bu durumda, zemindeki kum tanelerinin birbirinden uzaklaşmasına ve zemin direncinin kaybolmasına sebep olurlar.

Efektif gerilimin de kaybolduğu bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı malzeme davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak, suyla birlikte yüzeye doğru hareket

eder ve yüzeyden çıkmaya başlar. Zeminin sergilediği bu davranış biçimi "sıvılaşma" olarak tanımlanır [4].

Yumuşak dokulu deformasyon yüzeyleri stratigrafi literatüründe farklı kavramlarla yer alırlar. Bu farklılıklar söz konusu yapıların tanımlandığı kavramların çeşitliliğinden ileri gelmektedir. Bu yüzden bu kavram çeşitliliğini deformasyon yüzeyleri ile kıyaslamak güçleşmiştir.

Bunun dışında benzer deformasyon yapıları farklı şekillerde yorumlanmıştır. Bazılarının tamamen depolanma süreçleriyle oluştuğu öne sürülürken, bazılarının da sismik şoklarla ilişkili olduğu düşünülmektedir [5].

Büyük depremler sonrasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının mekânsal ve zamansal olarak doğru biçimde belirlenmesi, sismotektonik süreçlerin anlaşılması, hasar değerlendirmesi ve afet yönetimi açısından önemlidir. Bu bağlamda, Uydu Tabanlı Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) verilerine dayanan radar interferometrisi (InSAR) teknikleri, yer yüzeyindeki santimetre mertebesindeki deformasyonların geniş alanlarda ve yüksek doğrulukla izlenmesine olanak sağlamaktadır [6].

InSAR teknolojisi afet çalışmalarında temel olarak iki ana yaklaşım altında uygulanmaktadır: diferansiyel interferometriye dayalı DInSAR ve çok-zamanlı analizlere dayalı MT-DInSAR (PSInSAR, SBAS vb.) yöntemleri. DInSAR yöntemi, afet öncesi ve sonrası elde edilen uyumlu SAR görüntü çiftlerinden üretilen diferansiyel interferogramlar aracılığıyla, özellikle deprem gibi ani gelişen olayların neden olduğu yüzey deformasyonlarının santimetre ölçeğinde tespit edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Buna karşılık MT-DInSAR yöntemleri, daha uzun zaman aralıklarında deformasyon hızlarının ve zaman serilerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır [7].

Deprem kaynaklı yüzey deformasyonlarının InSAR ile tespitine yönelik çok sayıda çalışma literatürde yer almaktadır [8]. Sivrice ve Sisam depremleri öncesi ve sonrası Sentinel-1 görüntülerini kullanarak SNAP yazılımı aracılığıyla faz farklarından yüzey deformasyonlarını belirlemiş, sarılmamış faz verilerini görüş hattı doğrultusunda yer değiştirmeye dönüştürmüştür. Benzer biçimde Karşıoğlu vd. [9] Sivrice-Doğanyol-Pütürge bölgesinde meydana gelen 24 Ocak 2020 Elâzığ depremine bağlı yüzey çökmelerini Sentinel-1 verileri ve SNAP tabanlı DInSAR iş akışı kullanarak haritalamış; dikey yer değiştirme değerlerinin -19 cm ile +32 cm arasında değiştiğini ortaya koymuştur.

SNAP yazılımı, Sentinel-1 verileri için geliştirilmiş kapsamlı InSAR iş akışları sunması nedeniyle literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu iş akışları; yörünge düzeltmeleri, ortak kayıt (co-registration), interferogram üretimi, Goldstein faz filtreleme, Snaphu veya MCF tabanlı faz açma (phase unwrapping), fazdan yer değiştirmeye dönüşüm ve topoğrafik düzeltme adımlarını içermektedir [8,9]. Sun et al [10] de eş-sismik deformasyon alanını elde etmek için diferansiyel interferometri, filtreleme ve faz açma işlemlerinin InSAR sürecinin temel ve kritik bileşenleri olduğunu vurgulamaktadır.

Deprem sonrası yüzey deformasyonlarının daha karmaşık jeofizik süreçlerle birlikte ele alındığı çalışmalar da bulunmaktadır. Song et al. [11], 2021 Yunanistan deprem dizisini InSAR gözlemleri ile inceleyerek normal faylara bağlı kayma dağılımlarını ortaya koymuş; diferansiyel interferogramların uyarlamalı spektral filtreleme ve Minimum Cost Flow (MCF) yöntemi ile sarıldığını göstermiştir. He et al. [12], ise Sentinel-1 InSAR verilerini kullanarak 2024 Wushi deprem dizisine ait kosismik, artçı ve erken postsismik deformasyonları analiz etmiş ve bu verileri elastik yarı-uzay fay modelleri ile ilişkilendirmiştir.

Son yıllarda, InSAR ürünlerinin afet müdahalesi ve hızlı haritalama amacıyla operasyonel düzeyde kullanılmasına yönelik çalışmalar da artmıştır. Bekaert et al. [13] tarafından geliştirilen ARIA-S1-GUNW ürünü, sarılmamış faz ve interferometrik geometrinin doğrudan kullanıma hazır biçimde sunulmasıyla, depremler sonrası santimetre ölçeğinde yüzey yer değiştirmelerinin hızlı biçimde haritalanmasına olanak sağlamaktadır. Türkiye-Suriye depremleri özelinde Liu et al. [14], çok yörüngeli Sentinel-1 verileri ile InSAR analizleri gerçekleştirerek, atmosferik gecikme etkilerini ICA ve uzay-zamansal korelasyon yöntemleriyle azaltmış ve iki boyutlu deformasyon zaman serileri üretmiştir.

Türkiye'de meydana gelen büyük depremler, InSAR tabanlı yüzey deformasyonu analizlerinin önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, geniş bir coğrafyada önemli yüzey deformasyonlarına neden olmuş ve bu deformasyonların güvenilir biçimde haritalanması bilimsel ve uygulamalı açıdan kritik hale gelmiştir. Bu çalışma, söz konusu depremler sonrasında meydana gelen arazi deformasyonlarını Sentinel-1 SAR verileri, DInSAR yöntemi ve SNAP yazılımı kullanarak tespit etmeyi amaçlamakta; literatürde yaygın olarak kullanılan ve doğrulanmış InSAR iş akışlarını temel almaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından işletilen Sentinel-1 uydularına ait C-bandı SAR verileri kullanılmıştır. Deprem öncesi ve sonrası dönemleri kapsayan görüntüler, yüzeyde meydana gelen eş-sismik deformasyonların tespitine olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir. Sentinel-1 verilerinin deprem kaynaklı deformasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığı ve SNAP yazılımı ile etkin biçimde işlendiği önceki çalışmalarda da ortaya konulmuştur [8].

Deprem sonrası kısa zaman aralığında meydana gelen yüzey deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla Diferansiyel İnterferometrik SAR (DInSAR) yöntemi tercih edilmiştir. DInSAR, afet öncesi ve sonrası elde edilen uyumlu SAR görüntü çiftlerinden üretilen diferansiyel interferogramlar aracılığıyla, özellikle deprem gibi ani gelişen olayların neden olduğu yüzey deformasyonlarının santimetre mertebesinde tespit edilmesine olanak sağlamaktadır [6]. Bu yaklaşım, eş-sismik deformasyon alanlarının haritalanmasında literatürde yaygın biçimde kullanılmaktadır [10].

Tüm interferometrik işlemler Sentinel Application Platform (SNAP) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SNAP yazılımı, Sentinel-1 verileri için geliştirilmiş standart ve doğrulanmış InSAR iş akışları sunması nedeniyle literatürde sıklıkla tercih edilmektedir [8].

İnterferogram sonuçlarının doğruluğu, faz açma ve topoğrafik düzeltme sonrası elde edilen deformasyon değerlerinin hata analiziyle test edilmiştir. Hata analizi, referanssız (no-reference) RMS faz hatası (σ_ϕ) ve standart sapma (σ_{LOS}) hesaplamaları ile gerçekleştirilmiştir. Ortalama faz hatası ± 0.02 radian, bu değere karşılık gelen LOS yer değiştirme belirsizliği ise ± 0.6 cm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 50 rastgele seçilmiş piksel çifti üzerinde yapılan korelasyon analizi, faz tutarlılığının (coherence > 0.78) yüksek olduğunu göstermiştir. Bu değerler, InSAR verilerinin istatistiksel olarak güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır.

İş akışı şu temel adımlardan oluşmaktadır: İlk aşamada her bir Sentinel-1 görüntüsü için hassas yörünge (Precise Orbit Determination-POD) bilgileri uygulanmıştır. Bu adım, interferometrik faz bileşenlerinin doğru biçimde hesaplanabilmesi açısından gereklidir [7]. Deprem öncesi ve sonrası görüntüler, alt-piksel hassasiyetinde ortak kayıt işlemine tabi tutulmuştur. SNAP'te gerçekleştirilen S-1 Back Geocoding işlemi ile master görüntüye bağlı slave görüntülerden oluşan veri yığınları (stack) oluşturulmuştur [7, 10]. Ortak kayıt işlemi sonrasında, master ve slave görüntü çiftleri arasındaki faz farkları kullanılarak interferogramlar üretilmiştir. TOPS modunda elde edilen Sentinel-1 verilerindeki alt-sahne birleşimlerinden kaynaklanan etkiler, Deburst işlemi ile giderilmiştir [9]. Topografik faz bileşeni, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) kullanılarak interferogramlardan çıkarılmıştır. SNAP yazılımında topografik fazın büyük ölçüde giderilmesinde SRTM 30 m çözünürlüklü DEM verisi kullanılmıştır [7]. Interferogramlar, gürültüyü azaltmak ve faz sürekliliğini artırmak amacıyla Goldstein faz filtreleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu adım, faz açma işleminin başarısı açısından kritik öneme sahiptir [7, 9]. Filtreleme sonrasında interferometrik faz, sarılı (wrapped) fazdan gerçek (unwrapped) faz değerlerine dönüştürülmüştür. Faz açma işlemi, InSAR işleminin en kritik aşamalarından biri olup, bu çalışmada SNAP üzerinden Snaphu tabanlı faz açma yaklaşımı kullanılmıştır [8, 10]. Sarılmamış faz değerleri, radarın görüş hattı (Line of Sight – LOS) doğrultusunda yüzey yer değiştirmelerine dönüştürülmüştür. Fazdan yer değiştirmeye dönüşüm işlemi, faz değerlerinin metre cinsinden mutlak yüzey değişimlerini temsil edecek şekilde hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu dönüşüm sonucunda pozitif değerler yüzey yükselmesini, negatif değerler ise yüzey çökmesini ifade etmektedir [8]. Bu çalışmada elde edilen deformasyon değerleri, radar sensörü ile yer yüzeyi arasındaki Line of Sight (LOS) doğrultusunda ölçülen saf LOS yer değiştirmelerini ifade etmektedir. Kullanılan tek yörünge geometrisi nedeniyle sonuçlar, yüzeydeki gerçek üç boyutlu yer değiştirmenin LOS'a izdüşümünü temsil etmekte; dikey ve yatay bileşenler ayrı ayrı çözülmemektedir.

Son aşamada, elde edilen yer değiştirme haritaları Range-Doppler Terrain Correction yöntemi kullanılarak coğrafi koordinat sistemine aktarılmıştır. Böylece Kahramanmaraş

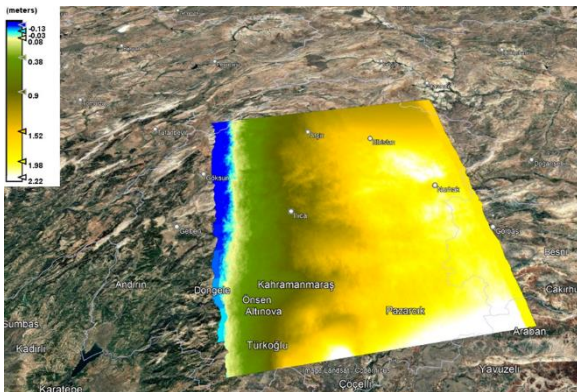
depremleri sonrasında oluşan yüzey deformasyonları, coğrafi olarak referanslanmış ve yorumlanabilir nihai ürünler hâline getirilmiştir.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

Elde edilen sonuca göre meydana gelen maksimum yer değiştirme miktarı yaklaşık 2.22 metredir. Deformasyon Aralığı açısından yüzey hareketleri-0.13 metre (çökme/uzaklaşma) ile +2.22 metre (yükselme/yakınlaşma) arasında bir spektrumda dağılım göstermektedir. Kahramanmaraş merkezli olarak; Pazarcık, Türkoğlu, Elbistan, Nurhak ve Göksun gibi kritik bölgeleri içine alan geniş bir alanın deformasyon geometrisi net bir şekilde izlenebilmektedir. Harita üzerinde renklerin keskin bir şekilde değiştiği hatlar, deprem sırasında kırılan fay segmentlerini ve bu segmentler boyunca meydana gelen ani yer değiştirmeleri temsil etmektedir. Pozitif yüzeyin yükselmesini veya uyduya yaklaşmasını ifade ederken; negatif değerler yüzey çökmesini veya uydudan uzaklaşan bir hareketi temsil etmektedir. Jeomorfolojik açıdan Kahramanmaraş ve çevresindeki yüksek deformasyon oranları, bölgedeki basen etkisi (havza etkisi) ve kalın alüvyon dolgu ile ilişkilendirilebilir; bu zeminler sismik dalgaların genliğini büyütürken yüzeydeki deformasyonun şiddetini artırmıştır.

Elbistan ve Pazarcık civarındaki yoğun sarı renkleri, her iki büyük sarsıntının (Mw 7.8) yarattığı kümülatif deformasyonu yansıtmaktadır. Bu veriler, bölgedeki "sismit" olarak adlandırılan deprem kaynaklı ikincil deformasyon yapılarının anlaşılması için temel teşkil etmektedir.

Karadoğan et al. [2], tarafından yapılmış olan 2 nolu şekil 6 Şubat depremleri ve sonrasındaki 10 gün içinde meydana gelen artçılarla yıkılmış bina sayılarının ilçe bazında dağılımı göstermektedir. Bu harita ile InSAR (İnterferometrik SAR) deformasyon haritası birlikte değerlendirildiğinde, yer kabuğundaki fiziksel yer değiştirme miktarı ile yapısal tahribat arasında doğrudan bir korelasyon olduğu görülmektedir.

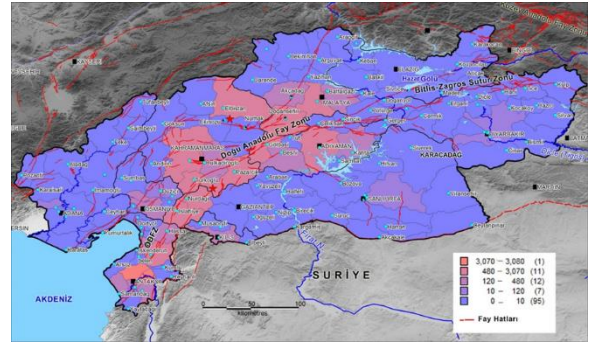


Şekil 1. Sentinel-1 Verileri Kullanılarak DInSAR Yöntemiyle Üretilen LOS (Görüş Hattı) Yönlü Yer Değiştirme İnterferogramı (Görsel, Sentinel-1 uydusuna ait C-bandı SAR verilerinin DInSAR (Diferansiyel İnterferometrik SAR) tekniği ve SNAP yazılımı kullanılarak işlenmesiyle elde edilmiştir).

InSAR haritasında görülen ve uydu bakış yönünde (LOS) maksimum 2.22 metreye ulaşan yer değiştirmeler, 2 nolu şeklindeki en yüksek yıkım oranlarıyla mekânsal olarak örtüşmektedir. 2 nolu haritadaki "kırmızı/pembe" tonlar; Antakya (3.070+ bina), Kahramanmaraş merkez (Dulkadiroğlu ve Onikişubat), Nurdağı, İslâhiye ve Elbistan gibi ilçeleri kapsamaktadır. InSAR görüntüsündeki keskin renk geçişleri, fay hatları boyunca meydana gelen ani enerji boşalımını ve yüzey yırtılmalarını temsil ederken, bu hatlar üzerindeki ilçelerde binaların enkaz haline gelmesinde yer hareketinin şiddeti belirleyici olmuştur.

Her iki haritanın en çarpıcı sonucu, Antakya-Maraş Grabeni boyunca uzanan yıkım koridorudur. Antakya, deprem merkez üssünden yaklaşık 140 km uzakta olmasına rağmen 2 nolu şekilde en çok yıkılan bina sayısına (3.070+) sahiptir.

InSAR haritasındaki yoğun deformasyon sinyalleri, bu bölgedeki kalın alüvyon dolgunun deprem dalgalarını büyütürken binalara ilettiğini ve zemin sıvılaşmasına bağlı çökme/oturma deformasyonlarını tetiklediğini doğrulamaktadır.



Şekil 2. 6 Şubat depremleri ve sonrasındaki 10 gün içinde meydana gelen artçılarla yıkılmış bina sayılarının ilçe bazında dağılımı haritası [2].

InSAR haritasının üst (kuzey) kısmında görülen sarı/beyaz tonlardaki geniş deformasyon alanı, Mw 7.6 büyüklüğündeki ikinci büyük depremin yarattığı etkidir. Bu fiziksel hareket, 2 nolu şekilde Elbistan (468 bina), Doğanşehir (897 bina) ve Malatya merkez (Battalgazi ve Yeşilyurt) üzerindeki yüksek yıkım sayılarıyla tam uyum içindedir. Nurhak ve Engizek Dağları arasındaki tektonik koridorda yer alan Elbistan ve çevresindeki yüksek deformasyon oranları, "dağ içi çek-ayır havza" yapısının sismik enerjiyi hapsetmesiyle açıklanabilir.

Deformasyon haritasında batıya doğru renklerin maviye (çökme/uzaklaşma) dönüştüğü ve yıkım haritasında "soğuk/mavi" olan bölgeler, Amanos Dağları'nın koruyucu etkisini göstermektedir. Amanos Dağları, sismik dalgaların yayılmasında bir bariyer görevi görerek depremin odak noktasına yakın olmasına rağmen Adana ve Ceyhan gibi bölgelerdeki yıkımı (Adana merkezde sadece 12 bina) sınırlı tutmuştur.

InSAR haritasındaki 2.22 metrelik dikey/yatay değişimler, 2 nolu şekil ile birleştirildiğinde; deprem riskinin sadece fay hattına yakınlıkla değil, morfolojik birimlerin (basen, plato, dağ) karakteriyle ilişkili olduğu kanıtlanmaktadır. Örneğin, Gaziantep ve Şanlıurfa platoları gibi otokton kalker yapılar üzerindeki yerleşmelerde, yüzey deformasyonu daha az

olduğu için yıkılan bina sayıları da (Şanlıurfa-Haliliye: 44 bina) belirgin şekilde düşük kalmıştır.

Elde edilen maksimum deformasyon değerleri (-0.13 m ile $+2.22$ m arası), ± 0.6 cm hata payı içinde değerlendirilmiştir. Bu hata düzeyi, Sentinel-1 C-band verisinin nominal ölçüm doğruluğu ($1-2$ cm) ile uyumludur. Dolayısıyla, gözlenen LOS yer değiştirmeleri %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu sonuçlar, deformasyon haritasındaki mekânsal desenlerin gerçek yüzey hareketlerini yansıttığını desteklemektedir.

Afetin insani ve yapısal bilançosunun coğrafi dağılımı ile bu yıkımın altındaki fiziksel yer kabuğu hareketini temsil eden InSAR verisi arasındaki uyum, yeni imar planlarında zemin özelliklerinin ve basen geometrilerinin, bir başka deyişle jeomorfolojik koşulların "fay hattına uzaklık" kriterinden daha öncelikli ele alınması gerektiğini göstermektedir.

İnterferogram çalışmaları, saha gözlemleri ve GPS verileriyle karşılaştırılarak depremin etki gücünü doğrulamak için kullanılabilir. Elde edilecek kartografik veriler, geleneksel yöntemlerle tespit edilmesi güç olan yüzey yırtılmalarının ve deformasyon merkez üssünün belirlenmesinde yararlanılabilir.

İnterferogram verileri, deprem dizisinin yeryüzünde yarattığı mekânsal tahribatın ve enerji boşalımının en somut bilimsel kanıtlarından biri olup, bölgedeki imar ve risk azaltma planlamaları için temel bir veri katmanı niteliğindedir.

Elde edilen deformasyon aralığı (-0.13 m çökme ile $+2.22$ m yükselme), bölgenin jeomorfolojik özellikleriyle (kalın alüvyon dolgu, basen etkisi ve zemin büyütmesi) uyumlu olup, deprem dalgalarının yıkıcı etkisini açıklamaktadır. Bu bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Sentinel-1 verilerinin DInSAR iş akışıyla elde edilen hassasiyetin, eş-sismik deformasyonların hızlı haritalanmasında etkili olduğunu doğrulamaktadır. Ancak, interferogramlardaki atmosferik gecikmeler ve topoğrafik hatalar gibi sınırlılıklar, sonuçların saha gözlemleri ve GPS verileriyle entegrasyonunu gerektirmektedir.

nSAR sonuçlarının istatistiksel güvenilirliği, deformasyonun mekânsal tutarlılığı ve düşük RMS hata değerleriyle desteklenmektedir. Bununla birlikte, atmosferik gecikme ve DEM kaynaklı faz hataları, ölçümlerde $\pm 0.5-1.0$ cm mertebesinde ek belirsizlik yaratabilir. Bu durum, saha GPS ölçümleriyle doğrulama gereksinimini ortaya koymaktadır.

"InSAR sonuçlarının istatistiksel güvenilirliği, RMS hata (σ) ve faz tutarlılığı (coherence) analizleriyle değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, Bekaert vd. [15] ve Ferretti vd. [16] tarafından tanımlanan yöntemlerle uyumludur. Ayrıca, atmosferik ve topoğrafik sistematik hataların etkisi, Ansari vd. [17]'de önerildiği gibi bias-düzeltilme yaklaşımıyla ele alınabilir."

Sismik yapılarının analizi, bölgenin paleosismik tarihçesine ışık tutmakta ve gelecekteki deprem risklerini tahmin etmede kritik rol oynamaktadır. Özellikle Elbistan ve Pazarcık civarındaki kümülatif deformasyonlar, iki büyük depremin ($M_w 7.8$ ve $M_w 7.6$) etkileşimini yansıtmakta; bu, sismotektonik modellerin geliştirilmesinde yeni ipuçları sunmaktadır. Bulgular, afet yönetiminde InSAR'ın operasyonel kullanımını teşvik etmekte, ancak veri erişimi ve

işleme hızı gibi zorluklar, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yaygınlaşmayı sınırlamaktadır.

Gelecek araştırmalar, MT-DInSAR gibi çok zamanlı yöntemlerle postsismik deformasyonları izleyerek, bölgenin uzun vadeli tektonik davranışını aydınlayabilir. Bu, risk azaltma stratejilerinin (imar planlaması, erken uyarı sistemleri) güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Sonuç olarak, InSAR tabanlı analizler, geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı geniş ölçekli afetlerde vazgeçilmez bir araçtır.

4.SONUÇ

Bu çalışma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında oluşan yüzey deformasyonlarını Sentinel-1 SAR verileri ve DInSAR yöntemiyle analiz ederek, fay hatları boyunca maksimum ~ 2.22 metrelik yer değiştirmeyi (aralık- 0.13 m çökme ile $+2.22$ m yükselme) net bir şekilde haritalamıştır. Elde edilen interferogram görseli, Kahramanmaraş merkezli geniş bir alanda (Pazarcık, Türkoğlu, Elbistan, Nurhak ve Göksun gibi bölgeler) deformasyon geometrisini ortaya koymaktadır. Bu deformasyonlar, bölgenin kalın alüvyon dolgusu, basen etkisi ve zemin büyütmesiyle ilişkilendirilerek, deprem dalgalarının yıkıcı etkisini açıklamaktadır. Veriler, sismik yapılarının paleosismik tarihçe ve gelecekteki riskler açısından önemini vurgulamakta; saha gözlemleri, GPS ölçümleri ve jeofizik modellerle doğrulanabilir niteliktedir.

Sonuçlar, deprem dizisinin mekânsal tahribatını ve enerji boşalımını somutlaştırarak, afet yönetimi, hasar değerlendirmesi ve risk azaltma stratejileri için kritik bir veri katmanı sunmaktadır. Özellikle imar planlaması ve erken uyarı sistemlerinde kullanılabilecek bu interferogramlar, geleneksel yöntemlerle tespit edilmesi zor olan yüzey yırtılmalarını hızlıca belirleme potansiyeli taşımaktadır. Ancak, atmosferik gecikmeler ve topoğrafik hatalar gibi InSAR sınırlılıkları göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelecek çalışmalar, MT-DInSAR gibi çok zamanlı yöntemlerle uzun vadeli deformasyon hızlarını inceleyerek, bölgenin sismotektonik süreçlerini daha kapsamlı aydınlayabilir. Bu tür analizler, benzer deprem riski taşıyan bölgelerde proaktif önlemlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını bildirmelidirler. Yazar çıkar çatışması olmadığını bildirmektedir.

ETİK BEYANI

Bu çalışmada, yazar "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamındaki tüm kurallara uyduklarını, ilgili yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" olarak belirtilen başlığı altındaki eylemlerden hiçbirini gerçekleştirmediklerini taahhüt ederler.

KAYNAKÇA

- [1] İTÜ., “04.17 Mw 7, 8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan) ve 13.24 Mw 7, 7 Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhak-Çardak) depremleri: Nihai Rapor.” İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2023.
- [2] S. Karadoğan, H. Yetmen ve C. Kuzucuoglu, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinin Bölgesel Etkileri ve CBS Teknikleriyle Jeomorfolojik Analizi.” Prof. Dr. Erdoğan Akkan Anısına Fiziki Coğrafya Araştırmaları-1, vol.1, İ. Çiçek, E. Öner ve R. İlhan, Eds. Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir, 2025, ss. 311-350.
- [3] A. Seilacher, “Fault-graded Beds Interpreted as Sismit.” *Sedimentology* 13, pp.155-159, 1969.
- [4] R. Ulusay, “Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler.” Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, No; 38, 4. Baskı, ss. 384, 2001.
- [5] S. Topal, M. Özkul, “Deprem Kökenli Deformasyon Yapıları ve Deprem Büyüklükleri ile İlişkileri.” Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Fakültesi Dergisi, C. 9, sayı 2, ss.245-252,2003.
- [6] U. Sefercik, G. Nazar ve M. Görken, “DInSAR ve MT-DInSAR teknolojileri ile afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetimi.” *Geomatik*, c.10, ss.251–273, 2025. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1601101>
- [7] E.Sarahoğlu, “Mapping surface deformation using SNAP-StaMPS after Seferhisar-Izmir earthquake.” *Natural Hazards*, 111, pp.687–708, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05073-1>
- [8] C. Altın, O. Yücel, “InSAR tekniği ile deprem kaynaklı yüzey deformasyonlarının belirlenmesi (Mw 6.7 Sivrice / Mw 7.0 Sisam).” Lisans bitirme çalışması, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, 2021.
- [9] A. Karşlıoğlu, M. H. Alkayış ve M. İ. Onur, “Sentinel-1 uydusu ile deprem kaynaklı yüzey çökme analizi: Sivrice–Doğanyol–Pütürge örneği,” *Gümüşhane Univ. J. Sci. Technol. Inst.*, c. 11, sayı 2, ss. 510–521, 2021. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.861951>
- [10] X. Sun, X. Chen, L. Yang, W. Wang, X. Zhou, L. Wang ve Y. Yao, “Using InSAR and PolSAR to assess ground displacement and building damage after a seismic event: Case study of the 2021 Baicheng earthquake,” *Remote Sens*, c.14, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14133009>
- [11] C. Song, C. Yu, G. Meldebekova, Z. Li, Q. Chen, J. Cheng, W. Zhang ve X. Wang, “Normal fault slips of the March 2021 Greece earthquakes sequence from InSAR observations.” *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, c.5, pp.50–59, 2022. <https://doi.org/10.11947/j.JGGS.2022.0106>
- [12] P. He, Y. Wen, X. Wang, A. Hooper ve G. Xu, “Coseismic, aftershock, and early postseismic deformation during the 2024 Mw 7.0 Wushi earthquake sequence, Xinjiang Province, China.” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, c.130, 2025, <https://doi.org/10.1029/2024JB030364>
- [13] D. Bekaert, N. Arena, M. G. Bato, B. Buzzanga, M. Govorcin, E. Havazli, K. Hogenson, H. Hua, A. Johnston, M. Karim, J. H. Kennedy, Z. Lu, C. Z. Marshak, F. Meyer, S. Owen, S. Sangha, G. Short, J. Wang ve R. Zinke, “The ARIA-S1-GUNW: The ARIA Sentinel-1 geocoded unwrapped phase product for open InSAR science and disaster response.” *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2023. <https://doi.org/10.1109/IGARSS52108.2023.10282671>
- [14] Y. Liu, S. Wu, B. Zhang, S. Xiong ve C. Wang, “Accurate deformation retrieval of the 2023 Turkey–Syria earthquakes using multi-track InSAR data and a spatio-temporal correlation analysis with the ICA method, *Remote Sensing*,” 16, pp.31-39, 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16173139>
- [15] Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR and GPS for measuring crustal deformation: Implications for estimating noise properties. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 436–449. <https://doi.org/10.1002/2014JB011557>
- [16] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [17] Ansari, H., De Zan, F., & Parizzi, A. (2021). Study of systematic biases in measuring surface deformation with SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(5), 3641–3658. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3011564>