



DInSAR ve MT-DInSAR Teknolojileri ile Afet Erken Uyarı, Tespit, İzleme ve Yönetimi

Umur Güneş Sefercık ¹, Mertcan Nazar ², Mahmut Görken ³

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, (sefercık, mnazar)@gtu.edu.tr

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Şeaatli Meslek Yüksekokulu, Tapu ve Kadastro Programı, Yozgat, Türkiye, mahmut.gorken@bozok.edu.tr

Kaynak Göster: Sefercık, U. G., Nazar, M., & Görken, M. (2025). DInSAR ve MT-DInSAR Teknolojileri ile Afet Erken Uyarı, Tespit, İzleme ve Yönetimi. Geomatik, 10 (2), 251-273.

DOI: 10.29128/geomatik.1601101

Anahtar Kelimeler

Afet İzleme
InSAR
DInSAR
MT-DInSAR
Doğal Afet

Araştırma Makalesi

Geliş:13.12.2024
Revize:13.02.2025
Kabul:14.02.2025
Yayınlanma:01.08.2025



Öz

Günümüzde, afetlerin engellenmesi veya hızlı müdahale edilebilmesi gibi amaçlarla birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmektedir. 21. yy ile beraber bu çalışmalarda, uzaktan algılama teknolojilerinden elde edilen verilerin kullanımı vazgeçilmez hale gelmiştir. Özellikle son on yılda, yüksek çözünürlük ve geniş kapsama alanı kabiliyetine sahip bazı uydulara ait verilerin ücretsiz sunulması ve insansız hava aracı (İHA) teknolojisinde yaşanan gelişmeler afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetme faaliyetlerinde uzaktan algılama verilerinin daha efektif kullanımını beraberinde getirmiştir. Bu doğrultuda kullanılan uzaktan algılama teknolojilerinin başında yapay açıklıklı radar (SAR) gelmektedir. SAR teknolojisini temel alan yöntemler içinde çoklu görüntü kullanımıyla hassas faz farkı ölçümüne olanak veren interferometrik SAR (InSAR), hedef alanda yüksek kalitede üç boyutlu (3B) kartografik tasvir potansiyeli sunan dijital yüzey modellerinin (DYM) ve mm mertebesinde deformasyon haritalarının üretimine imkan tanınması açısından öne çıkmaktadır. InSAR, doğal afetlerin merkez üssü, etki miktarı ve yayılım alanı gibi önemli metriklerini hızlı elde edebilme imkanı sunmaktadır. InSAR teknolojisi ile afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetim çalışmalarında diferansiyel InSAR (DInSAR) ve çok zamanlı DInSAR (MT-DInSAR) yöntemleri kullanılmaktadır. MT-DInSAR yönteminin en sık tercih edilenleri ise kısa baz altkümüsi (SBAS), sürekli saçıcılar interferometrisi (PSI) ve SAR tomografi (TomoSAR)'dır. Bu çalışmada, afet izlemede kullanılan InSAR teknikleri ele alınmış ve literatürde heyelan, tasman, deprem, volkanik aktivite ve sel konularında yapılmış önemli çalışmalarda SAR veri kaynağı, tercih edilen InSAR yöntemi, karşılan sorunlar ve çözüm önerileri ve ulaşılan sonuçlar sunulmuştur.

Disaster Early Warning, Detection, Monitoring and Management with DInSAR and MT-DInSAR Technologies

Keywords

Disaster Monitoring
InSAR
DInSAR
MT-DInSAR
Natural Disaster

Research Article

Received: 13.12.2024
Revised: 13.02.2025
Accepted: 14.02.2025
Published: 01.08.2025

Abstract

Today, numerous scientific studies are conducted for purposes such as prevent disasters or respond to them quickly. With the advent of the 21st century, the use of data obtained from remote sensing technologies in these studies has become indispensable. Especially in the last decade, the availability of free data from satellites with high resolution and wide coverage capabilities, along with advancements in unmanned aerial vehicle technology (UAV), have enhanced the effectiveness of remote sensing in disaster early warning, detection, monitoring, and management. Synthetic aperture radar (SAR) represents a leading technology in the field of remote sensing. Interferometric SAR (InSAR) is distinguished among SAR technology methods for its ability to measure phase differences with high precision using multiple images, enabling the generation of high-quality three-dimensional (3D) cartographic representations, digital surface models (DSM), and millimeter-scale deformation maps of the target area. InSAR provides the capability to rapidly obtain critical metrics such as the epicenter, impact magnitude, and spread area of disasters. In disaster detection, monitoring, and management studies, differential InSAR (DInSAR) and multi-temporal InSAR (MT-DInSAR) methods are utilized. Among the most commonly used MT-DInSAR methods are the Short Baseline Subset (SBAS), Persistent Scatterer Interferometry (PSI), and SAR Tomography (TomoSAR). This study reviews InSAR techniques for disaster monitoring, highlighting key literature on landslides, tsunamis, earthquakes, volcanic activity, and floods, while discussing SAR data sources, preferred InSAR methods, encountered challenges, solutions, and achieved results.

1. Giriş

Dünyanın çok çeşitli coğrafyalarında gerçekleşen deprem, heyelan, kuraklık, sel, volkanik aktivite, yangın gibi doğal ya da insan kaynaklı afetler can kaybı, yaralanma veya diğer sağlık sorunlarına sebebiyet verirken aynı zamanda oluşturduğu maddi hasar doğrultusunda toplumsal hizmetlerin aksamasına neden olarak insan yaşamını sosyo-ekonomik ve çevresel olarak olumsuz yönde etkilemektedir (UNISDR, 2009; Paul, 2011; Schwab ve ark., 2016). Dahası, afetler sonucunda meydana gelen fiziksel hasarlar ülkelerin ekonomik olarak kalkınmasına kısmi veya kalıcı olarak zarar verebilmektedir (Loayza ve ark., 2012). Kişilerin psikolojik sağlığının afet sonrası değişimi incelendiğinde, insanların yakınlarını kaybetmesi, binaların tahrip olması, şehir altyapısında meydana gelen hasar sonucu elektrik ve su gibi temel ihtiyaçlara ulaşımın kısıtlanması gibi olaylar sonucunda afet bölgesinde veya yakın bölgelerde yaşayan bireylerin psikolojik sağlığının olumsuz olarak etkilendiği gözlemlenmiştir (Rehdanz ve ark., 2015). Belçika’da bulunan Afetlerin Epidemiyolojisi Araştırma Merkezi (CRED) tarafından yayınlanan Acil Durum Veri Tabanı’na (EM-DAT) göre dünya çapında 2010-2021 yılları arasında gerçekleşen ve sayısı 4200’den fazla olan afetlerden 1.9 milyardan fazla insan etkilenirken 470 binden fazla kişi hayatını kaybetmiş ve yaşanan felaketler sonucunda iki trilyon dolardan fazla ekonomik hasar meydana gelmiştir. Türkiye’de 2010-2021 yılları arasında gerçekleşen afetler incelendiğinde çoğunlukla deprem, sel, heyelan ve orman yangınlarının gerçekleştiği gözlemlenirken yaşanan afetlerden 700 binden fazla kişinin etkilendiği, 1000’den fazla kişinin hayatını kaybettiği ve yaklaşık 3.5 milyar dolarlık ekonomik hasarın olduğu görülmüştür (EM-DAT, 2021). 2023 yılı Şubat ayında gerçekleşen Kahramanmaraş depremlerinde ise resmi olarak 50,000 insan hayatını kaybetmiş, binlerce konut ve tarihi bina yıkılmış ya da hasar görmüştür. Dünya üzerinde gerçekleşen afetler incelendiğinde, az gelişmiş veya gelişmekte olan ülkelerde, coğrafi konum, bölgenin jeolojik-jeomorfolojik özellikleri, ekonomik, sosyal, politik ve kültürel koşulların yeterli düzeyde olmaması gibi nedenlerle afetlere karşı kırılganlığın arttığı ve bu ülkelerin afetlerden daha çok etkilendikleri görülmektedir (Alcántara-Ayala, 2002). Diğer yandan, gelişmiş ülkelerde, afet etkilerinin azaltılması için ayrılan kaynak sayısının artmasıyla afet kaynaklı can kaybının ve Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYH) zararının azaldığı gözlemlenmektedir (Toya ve Skidmore, 2007).

Afetlerin gerçekleşmeden önlenmesi, gerçekleşenlerin ise hızlı şekilde hareket ederek toplum üzerindeki yıkıcı etkilerinin en aza indirilebilmesi için senaryolar oluşturulup doğru afet planlamalarının yapılması çok önemlidir (Lindell ve Prater, 2003). Bu noktadan hareketle, bazı uluslararası kuruluşlar afet planlaması konusunda ciddi çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Örneğin, Birleşmiş Milletler Afet Yardımı Kurulu (UNDRO) tarafından 1991 yılında yayınlanan el kılavuzunda, ideal afet yönetimi, afet öncesinde afet zararlarını azaltma/önleme ve afete hazırlık, afet gerçekleştikten sonra ise afet yardımı, afet sonrası güçlendirme ve yeniden yapılanma adımları

sunulmuştur. Ayrıca, dünya genelinde pek çok bilim insanı, gerçekleşmemiş afetlerin erken uyarı amaçlı risk haritalamalarının yapılması, gerçekleşmiş olanlarda ise hızlı tespit, izleme ve yönetim faaliyetleri ile afetlerin yıkıcı etkilerinin engellenmesi ya da en düşük düzeye indirilebilmesi temalı çok sayıda bilimsel çalışmaya imza atmıştır. Gelişen teknolojiye paralel olarak ortaya çıkan yeni teknikler sonucunda afet çalışmalarında kullanılan yöntemlerin çeşitliliği artmıştır. Bu bağlamda, modern hava ve uzay kaynaklı uzaktan algılama teknolojileri zaman içerisinde deprem, heyelan, sel, volkanik aktivite, tasman, orman yangınları, kuraklık ve kaya düşmesi gibi afetlerin risk haritalaması, tespit, izleme ve yönetiminde etkili ve vazgeçilmez birer araç haline gelmiştir (Chuvieco ve Congalton, 1989; Mantovani ve ark., 1996; Metternicht ve ark., 2005; Akgül, 2018; Yalçın, 2022; Altunel, 2023; Iqbal ve Mahmood, 2023; Yakar ve ark., 2019; Yılmaz, 2023; Gull ve ark. 2023; Bahadır ve ark., 2024; Eraslan ve ark., 2024; Jamil ve ark., 2024; Kadı ve Yılmaz, 2024; Noor ve ark., 2024).

Afet çalışmalarında, multispektral, hiperspektral ve termal görüntüleme gibi pasif ve lazer tarama ve yapay açıklıklı radar (SAR) gibi aktif algılama prensipli hava ve uzay kaynaklı uzaktan algılama sistemlerinden yararlanılmakta olup bu sistemlerden elde edilen mekânsal veriler ile karar verici mekanizmalar tarafından afet yönetim politikaları oluşturulmaktadır (Tralli ve ark., 2005). SAR, hareketli bir platform üstüne yerleştirilmiş radar antenlerinden gönderilen ve geri saçılan uyumlu sinyallerin birlikte değerlendirilip geniş alanlara ait görüntülerin elde edildiği dolayısıyla var olan fiziksel anten açıklığının platform hareketi doğrultusunda ve matematiksel bağıntılar yardımıyla yapay bir anten açıklığına dönüştürüldüğü bir sinyal işleme tekniğidir. Ortaya çıktığı zamanlarda askeri kullanım ile sınırlı olan SAR uydu sistemleri ilk olarak 1981 yılında Mekik Görüntüleme Radarı (SIR-A) ile sivil kullanıma sunulmuş, 1990-2000 yılları arasında gerçekleşen ERS-1/2 (C-Bant), JERS-1 (L-bant), Radarsat-1 (C-bant) uydu misyonları ile önemli adımlar atılmış ve biri 1994 yılında SIR-C/X-SAR (X, C ve L bant) adı altında diğeri 2000 yılında Mekik Radar Topoğrafya Misyonu (SRTM, X ve C bant) olarak gerçekleşen iki uydu misyonu ile SAR sistemlerinin sivil amaçlı kullanımı yaygınlaşmıştır (Moreira ve ark., 2013). Kendi enerjilerini üretme kabiliyetine sahip SAR sistemleri, güneş aydınlatmasına bağımlı çalışan kamera donanımlı pasif algılama sistemleri ile karşılaştırıldığında gece-gündüz ve her mevsim görüntüleme yapabilmeleri, hava koşullarından ve bulut varlığından etkilenmemeleri, çoklu polarize görüntüleme şansı sunmaları, bitki penetrasyon yeteneği gibi sebeplerle afet uygulamalarında daha yoğun kullanılmaktadır. Özellikle SAR teknolojisini temel alan yöntemler içinde çoklu görüntü kullanımıyla hassas faz farkı ölçümüne olanak veren interferometrik SAR (InSAR), 3B yeryüzü modellemelerinde ve afetlerde en sık kullanılan uzay kaynaklı yöntem haline gelmiştir (Crosetto ve Pasquali, 2008; Sefercik ve Dana, 2012). InSAR teknolojisi ile afetlerin öncesi ve sonrasında elde edilen çoklu SAR görüntülerinin faz farkı hesaplamasına dayalı olarak geniş alanlarda deprem, heyelan, tasman vb. büyük çaplı afetlerde oluşan yüzey deformasyonlarına ait metrik

bilgiler çok kısa süreler içinde elde edilebilmektedir. İnterferogram adı verilen InSAR faz farkı haritalarında, hedef bölgede oluşan yüzey deformasyonlarının merkez üssü, etki miktarı ve yayılım alanı bilgileri kullanılan uydunun dalga boyuna ve "fringe" adı verilen faz farkına bağlı ışık huzmelerinin oluşturduğu yükseklik değişim hatlarına göre hızlı şekilde tasvir edilebilmektedir. InSAR teknolojisi ile afet tespit, izleme ve yönetim çalışmalarında diferansiyel InSAR (DInSAR) ve Multi Temporal (çok zamanlı) DInSAR (MT-DInSAR) olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır. DInSAR, afet öncesi ve sonrasında elde edilmiş geometrik olarak uyumlu ikili, üçlü ya da dördü SAR görüntülerinden üretilen diferansiyel interferogramlardan yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amacıyla kullanılan ve genel olarak deprem gibi kısa süreli afetlerin 'cm' mertebesinde deformasyon etkilerinin tespit edildiği bir yöntemdir (Bamler ve Hartl, 1998). MT-DInSAR ise birkaç ay ya da yıl gibi uzun zamansal süreçlerde 'mm' mertebesinde yavaş yavaş gerçekleşen yüzey deformasyonlarının zaman serileri şeklinde işlenen çok sayıda (minimum 20 adet) SAR görüntüsünden üretilen interferogramların farkı kullanılarak izlenebilmesine olanak veren yöntemler bütünüdür. Dünya genelinde en yaygın şekilde kullanılan MT-DInSAR yöntemleri kısa baz altkümüsi (Small Baseline Subset=SBAS), sürekli saçıcılar interferometrisi (Persistent Scatterer Interferometry=PSI) ve SAR tomografi (TomoSAR)'dır (Hooper, 2008).

Bu makalede, afet tespit, izleme ve yönetiminde kullanılan InSAR yöntemleri hakkında bilgiler sunulmakta, dünya genelinde güncel eğilimleri tespit etmek amacıyla ağırlıklı olarak son yıllarda heyelan, deprem, tasman, volkanik aktivite ve sel afetleri özelinde yayımlanmış bilimsel makaleleri kapsayacak şekilde literatür analizleri yer almaktadır. Belirlenen amaçlar doğrultusunda makalenin ikinci bölümünde, radar görüntüleme bantları, SAR uydu sistemleri ve afet izleme çalışmalarında kullanılan InSAR yöntemleriyle ilgili temel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, InSAR yöntemleri ile gerçekleştirilen afet izleme çalışmaları içerisinde ele alınan afet, kullanılan veri seti (örn. uydu sistemi, frekans bandı), uygulanan yöntem ve afetten etkilenen alan hakkında kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Dördüncü ve son bölümde ise çalışmanın sonuçları ve önerilere yer verilmiştir.

2. Afet İzleme Çalışmalarında Kullanılan InSAR Yöntemleri

Optik uzaktan algılama sistemleri ile karşılaştırıldığında aktif mikrodalga algılama (radar) sistemleri bulut, sis, yağmur ve kar gibi hava olaylarından etkilenmemeleri, güneş gibi doğal ışık kaynaklarından bağımsız enerji üretebilmeleri, farklı polarize alım ve bitki örtüsünü penetre edebilme yetenekleri gibi çok sayıda avantaja sahiptir (Ulaby ve ark., 1981). Elektromanyetik spektrumun 1 mm-1 m dalgaboyu arasındaki mikrodalga algılama aralığında, aktif mikrodalga sistemler yanında pasif mikrodalga algılama sistemleri de yer almaktadır. Ancak bu sistemler, termal uzaktan algılama yapan optik sistemlerin prensiplerine uygun çalışmaları, antenler

yerine radyometrik tarayıcılar kullanmaları ve güneş aydınlanmasına ihtiyaç duymaları gibi nedenlerle afet izleme çalışmalarında kullanışlı değillerdir. Aktif mikrodalga algılama sistemleri, görüntüleyici radar, SAR, radar saçılmaölçer ve radar altimetresi gibi algılama sistemlerini kapsamaktadır. Bu sistemler, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesindeki algılama bantlarını kullanmakla birlikte optik algılama sistemlerine nazaran ortalama bir milyon kat daha geniş dalgaboylarına sahiptir (Tablo 1). Tablo 1'de gri olarak gösterilen algılama bantları, InSAR ile deformasyon haritalarının üretimi için siviller tarafından kullanılmakta, geri kalanlar ise askeri amaçlıdır. SAR algılama bantlarının dalgaboyu, frekans, mekansal çözünürlük ve penetrasyon yeteneği arasında önemli ilişkiler bulunmaktadır. Dalgaboyu ile frekans arasında ters orantı bulunmakta olup dalgaboyu en yüksek olan P bandın frekansı en düşüktür. P bandın henüz uydu platformlarında kullanımı gerçekleşmezken hava radarı uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Dalgaboyu ile radar sinyalinin bitki penetrasyon yeteneği arasında ise doğru orantı bulunmaktadır. En geniş dalgaboyuna sahip P ve L bantların penetrasyon kabiliyeti en yüksektir. Bitki penetrasyon yeteneği, özellikle yoğun orman kaplı coğrafyalarda gerçekleşen afetlerde hesaplanan deformasyon metriklerinin doğruluk düzeyini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, yoğun orman alanlarında deformasyon hesaplamalarında güvenilir düzeyde bitki penetrasyon yeteneği olmayan SAR uydu misyonları ile çalışılırken çok dikkat edilmelidir. Örneğin, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen Sentinel-1 SAR uydu misyonu, verilerinin ücretsiz olması ve sık periyotta görüntü alım avantajı nedeniyle dünya çapında afet izlemede en yaygın şekilde kullanılır hale gelmesine karşın C-bant algılama yapmakta ve bu nedenle bitki penetrasyon yeteneği bulunmamaktadır. Gerek bilimsel gerekse ticari çalışmalarda sektörü domine eden Sentinel-1, her biri 12 günlük zamansal çözünürlüğe sahip A ve B misyonlarının 2014 ve 2016 yıllarında fırlatılması sonucu SAR görüntü alım periyotunu 6 güne indirmeyi başarmıştır. Ancak, Sentinel-1B, 2021 yılı sonunda veri iletim arızası yaşamış ve misyon 2022 yılı Ağustos ayında sonlandırılmıştır. Yalnızca Sentinel-1A'nın işlevsel olması nedeniyle 12 güne çıkan zamansal çözünürlük, 5 Aralık 2024 tarihinde yörüngesine oturtulan ve Sentinel-1B ile aynı özellikleri taşıyan Sentinel-1C misyonunun devreye alınmasıyla tekrar 6 güne indirilmiştir.

Günümüze dek geliştirilen SAR sistemlerde dalgaboyu ve mekansal çözünürlük arasında ise ters orantı bulunmaktadır. Yani bitki örtüsü penetrasyon kabiliyeti bulunmayan X-bant sistemler en yüksek mekansal çözünürlüğü sunmaktadır. Bu sistemlere örnek olarak SAR algılamada 2007 yılında mekansal çözünürlük devrimini gerçekleştirerek 1 m mertebesine yükseltmiş Alman TerraSAR-X ve İtalyan Cosmo-SkyMed uyduları verilebilir. Bu uyduların X-bant antenlerinden gönderilen radar sinyalleri bitki taç yüzeylerinden geri dönmekte ve bitki altı topoğrafyanın hesaplanmasına olanak vermemektedir.

Tablo 1. Radar algılama bantları ve özellikleri.

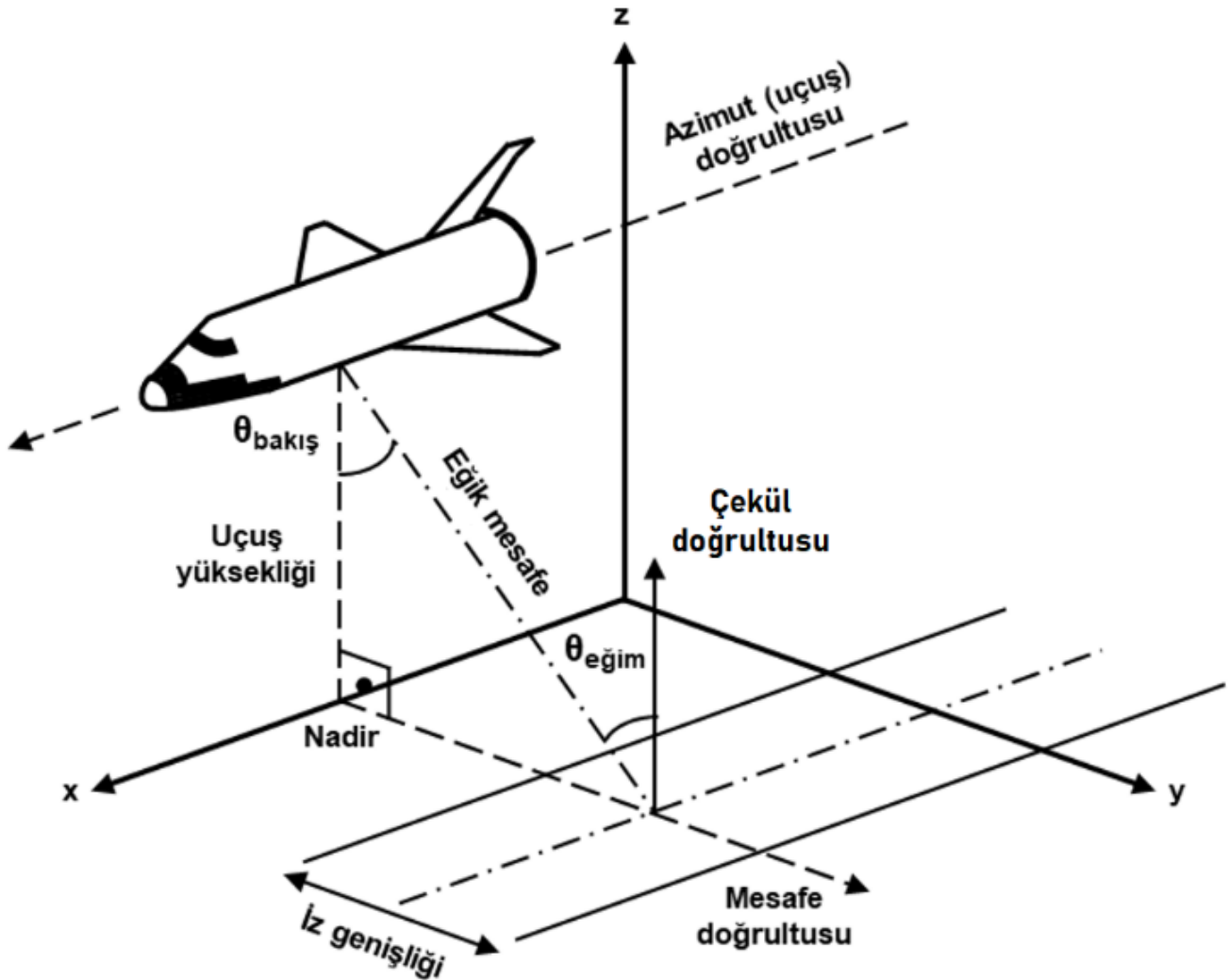
Band	Frekans (f) (GHz)	Dalgaboyu (λ) (cm)
P	0.225-0.390	133-76.9
L	0.390-1.550	76.9-19.3
S	1.550-4.200	19.3-7.10
C	4.200-5.750	7.10-5.20
X	5.750-10.90	5.20-2.70
K _u	10.90-22.00	2.70-1.36
K _a	22.00-36.00	1.36-0.83
Q	36.00-46.00	0.83-0.65
V	46.00-56.00	0.65-0.53
W	56.00-100.00	0.53-0.30

SAR sistemleri, çok kısa gerçek anten açıklıklarının matematiksel bağıntılar ve sinyal işleme teknikleri kullanılarak arttırılıp çok uzun yapay bir anten açıklığının oluşturulduğu, yüksek mekansal çözünürlüğe sahip görüntülerin elde edildiği ve geri saçılan sinyalin hem faz hem de şiddet açısından korunduğu aktif mikrodalga algılama sistemleridir (Curlander ve McDonough., 1991). Şekil 1, SAR görüntüleme geometrisini göstermektedir.

Şekil 1 incelendiğinde azimut (uçuş) doğrultusunda ilerleyen bir SAR sisteminin görüntüleme şeriti boyunca

mesafe (range) doğrultusunda yeryüzünde kapladığı yatay mesafeye iz genişliği (swath) denilmektedir. SAR sisteminden yeryüzü merkezine dik şekilde ilerleyen düşey doğrultu (nadir) ile antenden yayılan radar ışını arasındaki açı bakış açısı ($\theta_{\text{bakış}}$) ve bu açının tümleri depresyon açısı olarak isimlendirilmektedir. SAR uydu bakış açısı (Line of sight=LOS) yönündeki mesafe eğik mesafe (slant range) ve eğik mesafe doğrultusu ile sinyalin yeryüzüne ulaştığı noktadaki çekül doğrultusu arasındaki açı eğim açısı olarak ($\theta_{\text{eğim}}$) adlandırılmaktadır. Sinyalin yeryüzüne ulaştığı noktada sinyal doğrultusunun yüzey normali ile arasındaki açı ise lokal eğim açısı olarak tasvir edilmektedir.

Uzayda ilk radar donanımı, 1978 yılında National Aeronautics and Space Administration (NASA) tarafından yörüngeye oturtulan Seasat-1 deneysel dünya gözlem misyonunun algılayıcılarından biri olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, ilk uzay kaynaklı sivil amaçlı bilimsel SAR verisi elde edilmiş sonrasında farklı ülkelerin uzay ajansları tarafından çeşitli SAR misyonları gerçekleştirilmiş veya planlanmıştır (Tablo 2.). Doğrudan ilk uzay kaynaklı SAR misyonu ise 1981 yılında yörüngeye oturtulan SIR-A (Shuttle Imaging Radar) olmuştur.



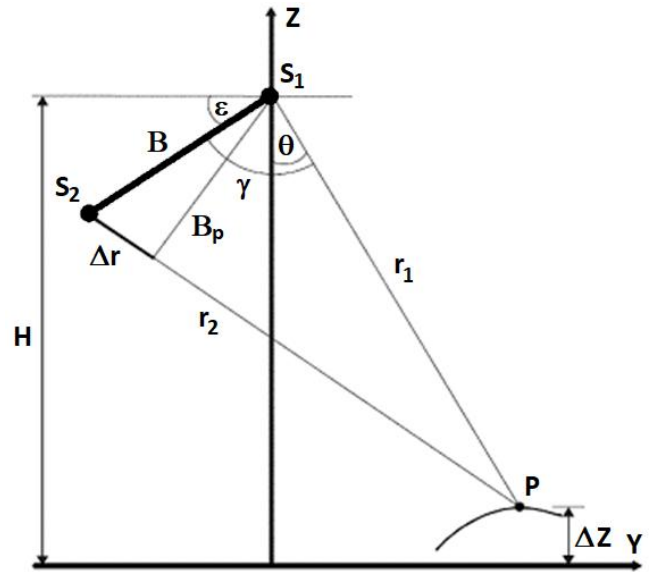
Şekil 1. SAR görüntüleme geometrisi.

Tablo 2. Gerçekleştirilen SAR misyonları.

SAR Misyonu	Frekans Bandı	Uzay Ajansı/Operatör Kuruluş	Misyon Tarihi
Seasat	L	NASA	1978
SIR-A	L	NASA/JPL	1981
SIR-B	L	NASA/JPL	1984
SIR-C/X-SAR	L, C	NASA/DLR/ASI	1994
ERS-1	C	ESA	1991-2000
JERS-1	L	JAXA	1992-1998
RADARSAT-1	C	CSA	1995-2013
ERS-2	C	ESA	1995-2011
SRTM	C, X	NASA/DLR/ASI	2000
ENVISAT	C	ESA	2002-2012
ALOS PALSAR-1	L	JAXA	2006-2011
RADARSAT-2	C	CSA	2007-Devam Etmekte
TerraSAR-X	X	DLR	2007-Devam Etmekte
COSMO-SkyMed	X	ASI	2007-Devam Etmekte
RISAT-2	X	ISRO	2009-Devam Etmekte
TanDEM-X	X	DLR	2010-Devam Etmekte
RISAT-1	C	ISRO	2012-Devam Etmekte
ALOS PALSAR-2	L	JAXA	2014-Devam Etmekte
Sentinel-1A	C	ESA	2014-Devam Etmekte
Sentinel-1B	C	ESA	2016-2022
Sentinel-1C	C	ESA	2024- Devam Etmekte
PAZ/SEOSAR	X	HISDESAT	2018-Devam Etmekte
SAOCOM-1A	L	CONAE/ASI	2018-Devam Etmekte
CAPELLA X-SAR	X	CAPELLA SPACE	2018-Devam Etmekte
RADARSAT Constellation	C	CSA	2019-Devam Etmekte
COSMO-SkyMed SG	X	ASI	2019-Devam Etmekte
SAOCOM-1B	L	CONAE/ASI	2020-Devam Etmekte
NISAR	S, L	NASA/ISRO	2025

InSAR tekniği, tek ve tekrarlı geçişli (single-pass ve repeat-pass) olmak üzere iki tip algılama geometrisinde veri sağlamaktadır (Cloude ve Papathanassiou, 1998; Massonnet ve Feigl, 1998). Tek geçişli interferometri iki ana prensip kullanır. İlk prensip, SRTM misyonunda olduğu gibi mekiğin gövde kısmında sinyal gönderici ve alıcı nitelikte antenler bulunması ve mekiğe monteli bir direğin ucunda da ikinci bir sinyal alıcı nitelikte antenin yer almasıdır. Bu sayede, InSAR geometrisinde monteli direğin boyu sürekli bilinen baz uzunluğu olmakta (SRTM’de 60 m) ve hedef alandaki yeryüzü objelerine ait dönüş sinyallerinin iki farklı alıcı anten tarafından farklı açılardan algılanmasını sağlamaktadır. İkinci tek geçişli InSAR algılama yöntemi ise aralarındaki değişken baz uzunluğu sürekli bilinen çoklu uydu sisteminin kullanımınıdır. Bu algılama tipine en iyi örneklerden biri TanDEM-X misyonudur. TerraSAR-X ve TanDEM-X ikiz uyduları, aralarındaki eğik baz uzunluğu sürekli bilinen şekilde bir helix geometride uçuş yaparlar. Helix geometri, uyduların kutuplarda baz uzunluğunun minimum, ekvatorunda ise maksimum olduğu bistatik görüntü alım geometrisidir (Sefercik ve ark. 2020). Çoklu uydu kullanımı sayesinde, yeryüzü hedef objelerinden dönen radar sinyalleri farklı konumdaki ve baz uzunlukları bilinen SAR antenleri tarafından farklı açılardan algılanır. Tek geçişli InSAR yöntemlerinin en büyük avantajı eş-zamanlı sinyal kaydı sayesinde eş atmosferik ve yeryüzü koşullarında veri alımıdır. Tekrarlı geçişli InSAR tekniğinde ise tek SAR anteni ile aynı bölgeden farklı zamanlarda tekrarlı olarak geçilmesi prensibi bulunmaktadır. Bu yöntemde atmosferik etkiler ve yeryüzü koşullarının değişimi elde edilen verilerin uyumunu düşürebilen parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 2 ve eşitlik 1, sırasıyla InSAR görüntüleme geometrisini ve temel InSAR bağıntısı ile

hedef nokta yükseklik hesabını yansıtmaktadır. Şekilde, S_1 ve S_2 SAR antenlerini, B , SAR antenleri arasındaki eğik baz uzunluğunu (normal baz uzunluğu), B_p , SAR antenleri arasındaki dik baz uzunluğunu, ε , baz uzunluğu eğim açısını (deklınasyon), θ , S_1 SAR anteninin bakış açısını, H , S_1 SAR anteninin irtifasını, r_1 ve r_2 SAR antenlerinin yeryüzündeki P noktasına olan mesafelerini ifade etmektedir. Eşitlik 1’de, ΔZ , yeryüzündeki P noktasının yüksekliğini, $\Delta\phi$, faz farkını, λ , algılayıcı antenin dalgaboyunu temsil etmektedir.

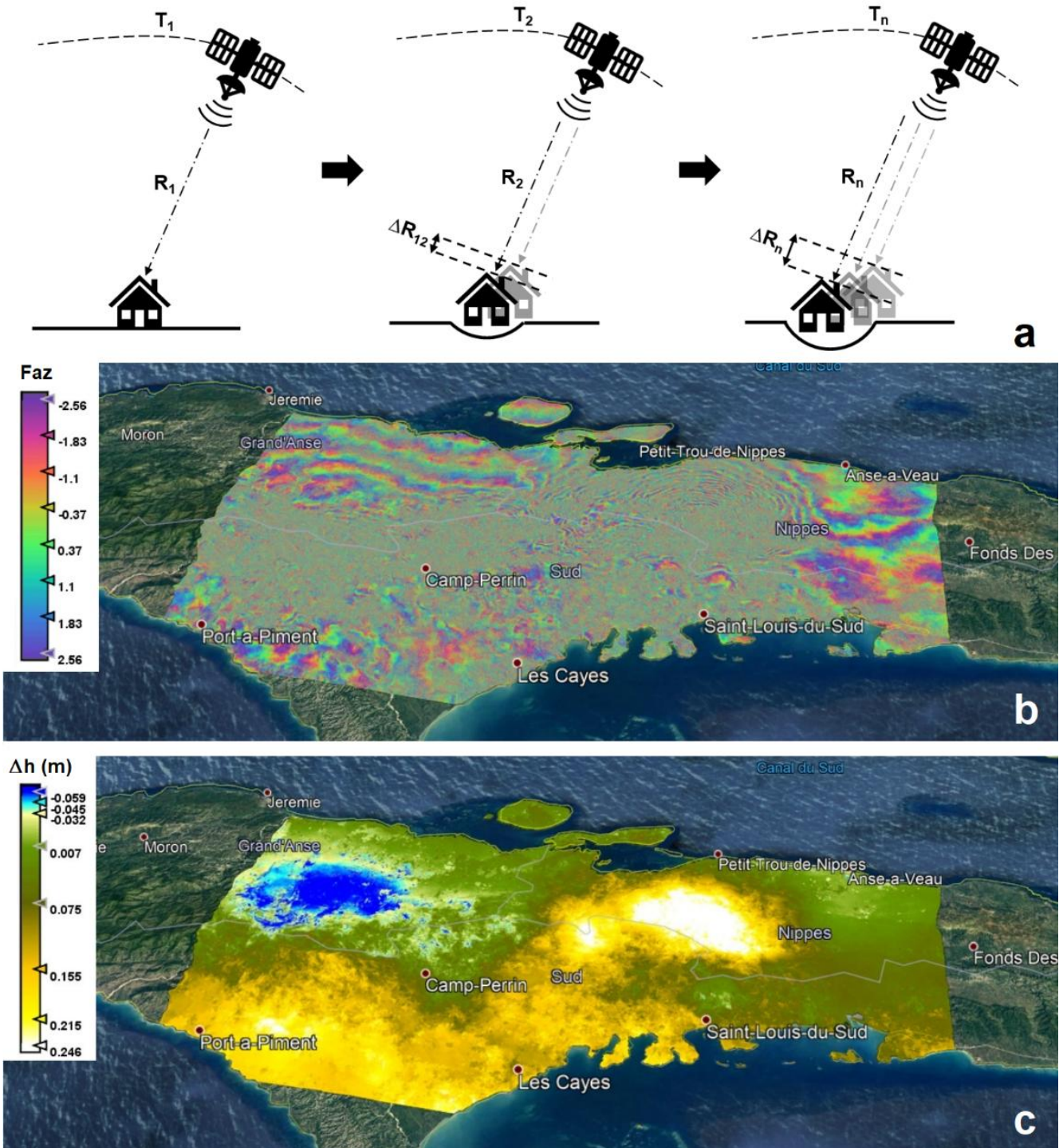
**Şekil 2.** InSAR görüntüleme geometrisi.

$$\Delta Z = H - r_1 \times \cos\left[\varepsilon + \sin^{-1}\left(\frac{(\Delta\phi \times \lambda)}{2\pi \times B}\right)\right] \quad (1)$$

2.1. Diferansiyel InSAR (DInSAR) Yöntemi

Yukarıda da belirtildiği gibi DInSAR, deprem, tasman ya da heyelan gibi ani gerçekleşen afetlerin öncesi ve sonrasında elde edilmiş geometrik olarak uyumlu ikili, üçlü ya da dörtlü SAR görüntülerinden üretilen interferogramlardan afetlerin yarattığı yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, afet alanındaki yeryüzü nesnelerinin afet öncesi ve sonrası zamanlarda radar algılayıcının LOS yönünde elde edilen faza dayalı mesafe farklarına göre algılayıcıya yaklaşım uzaklaşmaları değerlendirilir. Algılayıcıdan uzaklaşma durumu çökme, yaklaşma durumu ise kabarma şeklindeki yüzey

deformasyonu olarak yorumlanır. Faz farklarının doğru şekilde yorumlanabilmesi amacıyla topoğrafyadan kaynaklanan faz değişimlerinin giderilmesi için aynı bölgeye ait bir dijital yükseklik modeli (Digital Elevation Model-DEM) veya farklı zamanda üretilen bir interferogram kullanılarak fark alma işlemi gerçekleştirilmektedir (Gabriel ve ark., 1989; Liu ve ark., 2014). Şekil 3’de DInSAR çalışma prensibi ve 14 Ağustos 2021 tarihinde gerçekleşen 7.2 M_w büyüklüğündeki Haiti depremi için Sentinel-1 SAR uydu verilerinden üretilen diferansiyel interferogram ve deformasyon haritası gösterilmektedir.



Şekil 3. (a) DInSAR çalışma prensibi, (b) Haiti depremi (2021, 7.2 M_w) diferansiyel interferogram, (c) Haiti depremi deformasyon haritası.

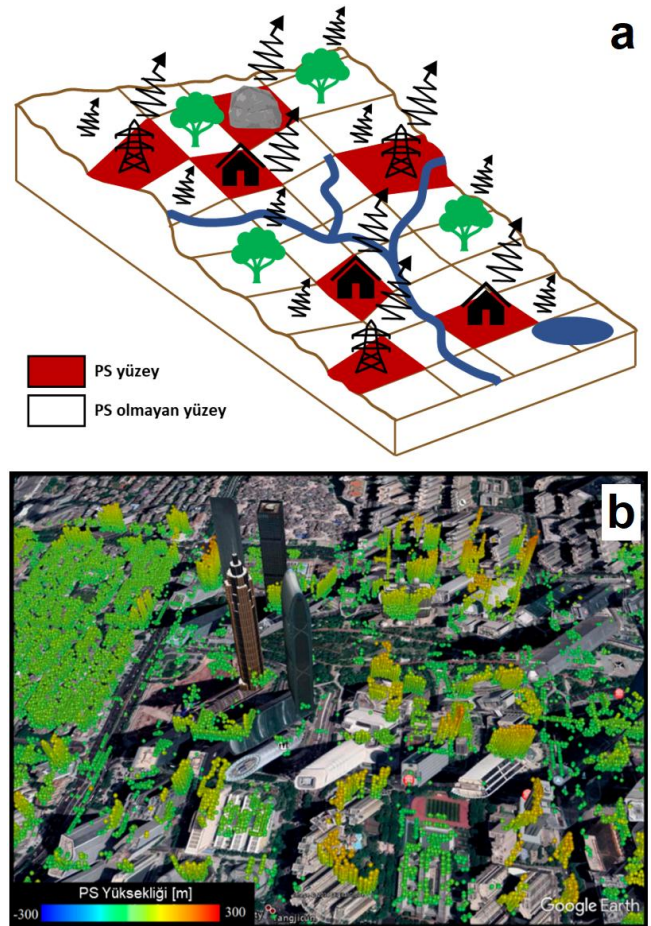
DInSAR yöntemi, ani gerçekleşen ve genelde cm mertebesinde yüzey deformasyonlarına sebep olan afetlerin tespit edilmesinde faydalı sonuçlar üretmekle birlikte aylar veya yıllar bazında gerçekleşen ve mm hassasiyetinde yüzey hareketlerinin tespitini gerektiren tespit ve izleme çalışmalarında mekansal ve geometrik dekorelasyon, atmosfer etkisi gibi nedenlerle kısıtlı kalmaktadır (Usai, 2003; Wasowski ve Bovenga, 2014). DInSAR yönteminin kısıtlı kaldığı çalışmalarda MT-DInSAR yöntemi devreye girmektedir. Dünya genelinde özellikle son 15 yılda oldukça popüler olan MT-DInSAR'ın en sık tercih edilen yöntemleri SBAS ve PSI'dir. SBAS ve PSI kadar sık tercih edilmese de çeşitli afet izleme çalışmalarında TomoSAR yönteminden de yararlanılmaktadır. MT-DInSAR yöntemlerinin temel prensibi, yüzey deformasyonu izlenecek hedef alana ait kısa zamansal baz uzunluğuna sahip çok sayıda SAR görüntüsünün birlikte değerlendirilmesi ve oluşturulan zaman serileri ile kısa periyotta gerçekleşen mm mertebesindeki değişimlerin hassas şekilde izlenebilmesidir.

2.2. Sürekli Saçıcı İnterferometri (PSI) Yöntemi

MT-DInSAR'ın en yoğun talep gören yöntemlerinden biri olan PSI, güçlü ve stabil radar sinyal yansıması sağlayan bina, köprü, kaya gibi sürekli saçıcı (Persistent Scatterer=PS) yüzeylerde LOS yönündeki konum değişimlerini kullanarak hedef alanlarda belirli periyotlarda gerçekleşen deformasyon miktarlarını hesaplamak amacıyla kullanılır. Bu yöntemde, SAR görüntüleri üzerinde üstü üste bindirilmiş şekilde ortaya çıkan atmosferik faz etkisinin giderilmesi amacıyla çoklu diferansiyel interferogramlar üretilir. Interferogramlarda, piksel sinyal dönüş şiddeti dağılımına ait zaman serileri PS noktaları temelinde analiz edilerek mm düzeyinde deformasyon tespitleri yapılır (Ferretti ve ark., 2001). Zaman serilerinin piksel sinyal şiddeti değerlerine göre analizi yöntemi, yüksek sinyal gürültü oranına (Signal to Noise Ratio=SNR) sahip insan yapımı yapılar vb. parlak PS'lerin tespitinde yüksek başarı oranına sahip olsa da SNR'nin düşük olduğu PS'lerin tespitinde bu yöntem sınırlı kalmaktadır (Hooper ve ark., 2004). Tekniği uygularken, geçmişte alınan SAR görüntü serilerini kullanarak yüzey deformasyonlarını ortaya koymanın yanında atmosferik faz ekranı (APS) etkisini hesaplamak hayati öneme sahiptir. PS'lerdeki konum değişimleri ve buna bağlı deformasyon hesaplamaları ancak APS etkisinin eliminasyonu ile yorumlanabilir doğruluğa ulaşır. APS etkilerinin doğru hesaplanması için PS'lerin yeterli yoğunlukta ve radyal dağılım göstermeleri çok önemlidir. Bu doğrultuda, PS yoğunluğu olarak 5-10 adet/km² alt koşuldur. Bu yoğunluğa ulaşmak, tarım ve orman dominant alanlarda PS özellikli objelerin çok az sayıda olması nedeniyle oldukça zorken insan yapısı nesnelere yoğun olduğu kentsel alanlarda oldukça kolaydır. Kentsel alanlarda PS yoğunluğu ortalama 100-400 adet/km² dir.

PSI, aylar ya da yıllar içinde yavaş yavaş gerçekleşen ve heyelan ve tasman gibi afetlere neden olan mm mertebesindeki yüzey deformasyonlarının izlenmesinde çok etkin bir yöntemdir. PSI, klasik DInSAR yöntemine nazaran kısa zamansal bazlarda elde edilmiş çok daha

fazla sayıda SAR görüntüsü ile işlem yapar. Başarılı bir deformasyon izleme süreci için PSI tekniğinde minimum 15-20 adet uygun geometride SAR görüntüsü işlenmelidir. PSI analizleri sonucunda deformasyon zaman serileri, belirli bir zaman aralığındaki ortalama yer değişim hızı, SAR görüntülerine ait atmosferik faz bileşeni gibi ürünler elde edilebilmektedir (Crosetto ve ark., 2010). Şekil 4'te, örnek bir topoğrafya üzerinde bina, elektrik direği, kaya gibi PS özelliği gösteren nesnelere ve vejetasyon, toprak gibi PS özelliği taşımayan bileşenlerden dönen radar sinyallerinin güçleri gösterilmiş ve kentsel alanda gerçekleştirilen bir PSI analizi sonucunda elde edilen PS noktalarına yer verilmiştir.



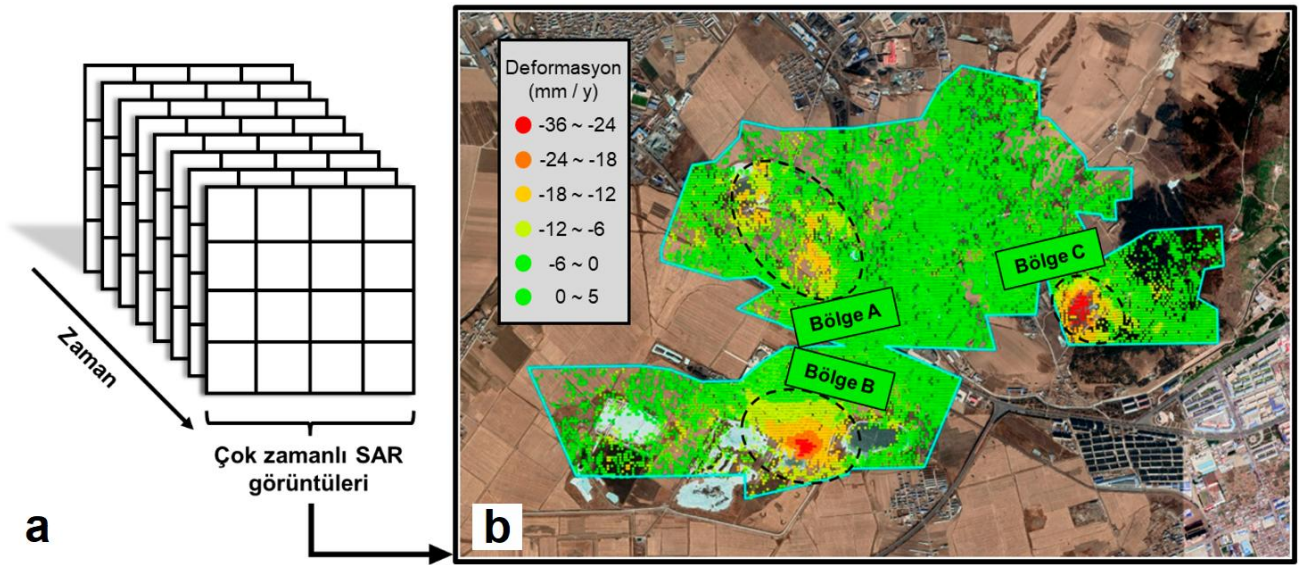
Şekil 4. (a) Örnek bir arazi üzerindeki PS özelliği gösteren objelerin gösterimi, (b) uydu görüntüsü üzerinde PSI yöntemi ile tespit edilen PS noktalarının gösterimi (Wang ve ark., 2019).

2.3. Kısa Baz Altkümesi (SBAS) Yöntemi

MT-DInSAR tekniklerinden biri olan SBAS, mekansal dekorelasyon ve topoğrafya etkisinin azaltılması amacıyla kısa baz uzunlukları ile elde edilmiş diferansiyel interferogramların kullanıldığı ve bu sayede mm mertebesindeki yüzey deformasyonlarının zamansal olarak tespit edildiği bir yöntemdir (Berardino, 2002). Bu yöntemde, PSI tekniğinde olduğu gibi tekil PS noktalarının kullanımının aksine, görüntülerin bütününde yüksek korelasyona sahip dağılmış hedefler bir arada incelenir. SBAS tekniği ile elde edilen mekansal ve zamansal veri bütünüyle atmosferik faz hatası

giderilerek, deformasyon haritaları ve piksel bazlı deformasyon zaman serileri üretilmektedir (Sefercik ve ark., 2024). SBAS tekniği geniş alanlarda heyelan, tasman, volkanik veya tektonik hareketlere bağlı olarak oluşmuş deformasyonların tespit edilmesinde kullanılan bir yöntem olup tekil yapıların deformasyon analizi gibi yerel ölçekteki çalışmalar için uygun değildir (Lanari ve ark., 2004). SBAS yöntemiyle kısa zamansal baz uzunluğuna sahip çoklu SAR görüntüleri kullanılarak oluşturulan çok bakışlı (multilook) interferogramların işlenmesi doğrultusunda ortalama deformasyon hızı haritaları ve yer değiştirme zaman serileri üretilmektedir (Casu ve ark., 2006). Yöntemde, deformasyon izlenecek toplam zaman aralığının yaklaşık ortalarındaki bir tarihe ait bir SAR görüntüsü süpermaster (referans görüntü) olarak seçilir ve tüm tarihlerdeki görüntüler süpermaster ile eşleştirilir

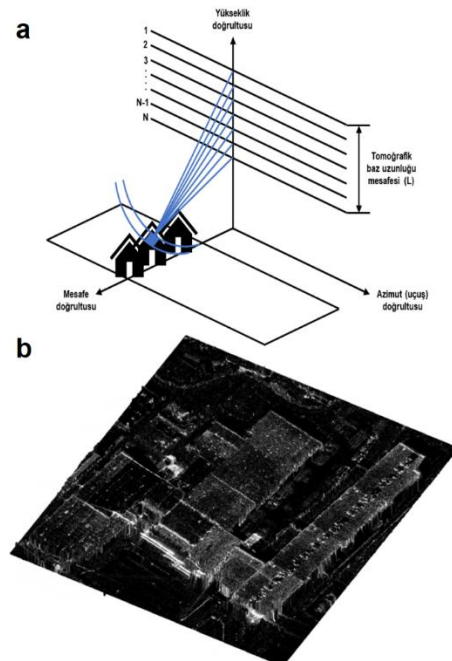
(coregistration). Bu işlem sonucunda, toplam görüntü sayısının (n) ikili kombinasyonu kadar diferansiyel interferogram oluşturulur. Bu interferogramların faz farkı hesaplanır. Yüksek korelasyon sağlanabilmesi amacıyla, temporal baz uzunluğu diğerlerine göre daha küçük olan görüntü çiftleriyle oluşturulmuş veriler kullanılır. Daha sonra bu verilerdeki yüksek uyuma (high coherence) sahip hedeflere, lineer cebirde (linear algebra) kullanılan tekil değer ayrışımı (SVD) yöntemi tabanlı bir yaklaşım uygulanarak deformasyon trendi belirlenmiş olur. Şekil 5, SBAS tekniği ile farklı tarihlerde elde edilmiş çoklu SAR görüntüleri kullanılarak örnek bir çalışma alanındaki farklı bölgelerde tespit edilmiş ortalama yüzey deformasyon hızlarını göstermektedir (Chen et al., 2020).



Şekil 5. SBAS tekniği ile farklı tarihlerde elde edilmiş çoklu SAR görüntüleri (a) kullanılarak bir bölgeye ait ortalama yüzey deformasyon hızının tespit edilmesi (b) (Chen et al., 2020).

2.4. SAR Tomografi (TomoSAR)

InSAR teknolojisinde, aynı obje üzerinde farklı yüksekliklerde bulunan sinyal saçıcı yüzeylere ait bazı yansımalar ayırt edilememektedir. Bu sorunun çözümü için geliştirilmiş TomoSAR tekniğinde, LOS yönüne ve azimut (uçuş) doğrultusuna dik olacak şekilde ikincil bir yapay açıklık oluşturularak farklı bakış geometrilerinde alımlar yapıp yükseklik doğrultusunda yüksek mekânsal çözünürlükte 3B görüntülemeler elde edilmektedir (Reigber ve Moreira, 2000) (Şekil 6). DInSAR tekniği ile TomoSAR tekniğinin birleşimi olarak tanımlanabilecek diferansiyel TomoSAR metodunun geliştirilmesiyle çoklu baz uzunluğu alımları yapıp aynı azimut-mesafe (azimut-range) hücreindeki çoklu saçıcı hızları ve yükseklikleri için ortak çözünürlük imkânı sağlanmaktadır (Lombardini, 2005).



Şekil 6. (a) TomoSAR tekniğinin çalışma prensibi, (b) TomoSAR kullanılarak üretilmiş 3B yansıtım haritası (Zhu ve Bamler, 2011).

3. Bulgular

Literatürde, InSAR teknikleri kullanılarak doğal afetler sonucu oluşan yüzey deformasyonlarının veya arazi örtüsündeki değişimin incelenmesi oldukça popüler bir konudur. Bu bölümde, bilimsel literatürde, heyelan, tasman, deprem, volkanik aktivite ve sel afetleri özelinde farklı InSAR teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetim çalışmaları hakkında incelemeler sunulmuştur.

3.1. Heyelan

Kaya, toprak, suni dolgu veya bunların bütününi içeren eğim oluşumuna sebebiyet veren malzemelerin aşağı ve dışa doğru hareketine neden olan çeşitli süreçler heyelan olarak tanımlanmaktadır (USGS, 2004). Yoğun veya uzun süreli yağışlar, depremler, hızlı şekilde gerçekleşen kar erimesi, volkanik aktiviteler ve çeşitli insan faaliyetleri gibi olaylar heyelan oluşumuna sebep olabilmektedir (Guzzetti ve ark., 2012). Yerleşim yerlerinde veya yakın bölgelerinde gerçekleşen heyelanlar can kaybına, binalarda ve altyapıda hasar oluşmasına neden olabilmektedir bu nedenle bu bölgelerde gerçekleşen heyelan olaylarının izlenmesi ve buna karşı önlem alınması gerekmektedir. Hava fotoğraflarının yorumlanıp arazi çalışmalarıyla desteklenmesi gibi geleneksel yöntemler sonucunda ya da optik uydu veya SAR sistemleri gibi modern uzaktan algılama sistemleri kullanılarak elde edilen heyelan envanter haritaları yardımıyla belirli bir zaman aralığında bir bölgede gerçekleşen heyelan olayları tespit edilip kayıt altına alınabilmektedir (Guzzetti ve ark., 2000). Heyelan envanter haritalarından yararlanılarak heyelan riski taşıyan bölgeler belirlenip, duyarlılık analizleri gerçekleştirilirken, aynı zamanda çok zamanlı olarak oluşturulan envanterler kullanılarak heyelan olaylarının izlenmesine olanak sağlanmaktadır (Scaioni et al., 2014). InSAR teknikleri bir bölgedeki heyelan olayının tespitinde (Rosi ve ark., 2018), heyelan etki alanının sınırlarının belirlenmesinde (Dai ve ark., 2021), heyelan yer değiştirme veya deformasyon hızının tahmin edilmesinde (Cenni ve ark., 2021), heyelan aktivite durumunun belirlenmesinde (Tiwari ve ark., 2020) ve heyelan tipinin sınıflandırılmasında (Crippa ve ark., 2021) dünya genelinde yoğun şekilde kullanılmaktadır. Polonya Karpat Dağları bölgesinde bulunan Roznow Gölü etrafındaki 75 km²'lik bir alana ait var olan heyelan envanter haritasının güncellenmesi amacıyla Pawluszek-Filipiak ve ark. (2021), farklı tarih ve yörüngelerdeki ALOS PALSAR, Sentinel-1A ve Sentinel-1A/B SAR görüntülerini kullanarak PSI yöntemiyle bölgedeki heyelan olaylarını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen PSI analizleri sonucunda potansiyel hasar haritaları üretilmiş ve ALOS PALSAR ve Sentinel-1A görüntüleri kullanılarak 128 ve 130 adet heyelan, Sentinel-1A/B görüntüleri kullanılarak 205 adet heyelan için faaliyet durumu güncellemesi yapılmıştır. Böylelikle çalışmadaki diğer uydu görüntüleri ile karşılaştırıldığında Sentinel-1A/B görüntülerinin birlikte kullanılması ile heyelan faaliyet durumu güncellemesi bakımından daha yüksek performans elde edilmiştir (Pawluszek-Filipiak ve ark., 2021). Farklı yörünge modlarında (ascending=yükselen,

descending=alçalan) elde edilmiş SAR görüntüleri kullanılarak heyelana ait yatay ve düşey hareket bileşenleri tespit edilebilmektedir. Kuzeybatı Sicilya'da (İtalya) bulunan, yapılaşma oranının genel arazi örtüsü içerisinde %40'tan az olduğu Piana degli Albanesi ve Marineo bölgelerine ait heyelan envanter haritalarını yenilemek amacıyla Novellino ve ark. (2017), İtalyan COSMO-SkyMed uydusundan elde edilen SAR görüntülerini kullanarak SBAS analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen SBAS sonuçları, hava fotoğrafları ve gerçekleştirilen arazi çalışmaları sonucunda 84 adet heyelan olayı doğrulanırken 67 adet yeni heyelan tespit edilmiş ve heyelan haritasında gösterilen 79 adet heyelana ait aktivite durumu güncellenmiştir (Novellino ve ark., 2017). İtalya'da Arno Nehir Havzası'nda gerçekleşen <60 mm/yıl yer değiştirme hızına sahip aşırı yavaş heyelanların (Varnes, 1978; Cruden ve Varnes, 1996) belirlenmesi için Lu ve ark. (2012), Radarsat SAR görüntülerini kullanarak PSI analizi gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda var olan heyelan envanter haritasındaki 21444 adet heyelan olayından 3203 tanesi (tüm olayların yaklaşık %15'i) doğrulanmış ve bölgede yeni heyelan olayları tespit edilmiştir (Lu ve ark., 2012). Yoğun bitki örtüsüne sahip alanlardaki heyelan olaylarının izlenmesinde geniş dalgaboylu SAR sistemlerinin bitki penetrasyon yeteneğinden yararlanılmaktadır. Bitki örtüsünün hâkim olduğu Malezya'nın Cameron Dağlık Bölgesi içerisindeki tropikal orman alanında bulunan Gunung Geçidi'nde gerçekleşen heyelan olaylarının tespit edilmesi amacıyla Jebur ve ark. (2015), yoğun bitki örtüsünü penetre edip arazi yüzeyine ulaşabilecek yaklaşık 24 cm dalga boyuna sahip bir L-band SAR misyonu olan ALOS PALSAR'dan yararlanmışlardır. Elde edilen SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen DInSAR analizi sonucunda bölgedeki yatay yer değiştirme hareketinin 1 m ile 10 m aralığında değiştiği tespit edilmiş ve sonuçlar yersel GNSS gözlemleriyle 20 farklı noktada karşılaştırılarak karesel ortalama hata ve R² değerleri sırasıyla 0.115 ve 0.841 olarak hesaplanmıştır (Jebur ve ark., 2015).

InSAR teknikleri kullanılarak bir bölgede gerçekleşen heyelan olaylarına ait yıllık deformasyon veya yer değiştirme hızları tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, elde edilen deformasyon hızları kullanılarak heyelanlar aktivite durumu, heyelan tipi ve ilerleme hızına göre sınıflandırılmaktadır. Endonezya'daki Yogyakarta Şehri'nde bulunan Kayangan Havzası'nda gerçekleşen heyelan olaylarının tespit edilmesi için Putri ve ark. (2013) tarafından 4 adet yükselen yörüngedeki ALOS PALSAR görüntüsü kullanılarak DInSAR yöntemi uygulanmıştır. DInSAR analizi ve yersel gözlemler sonucunda bölgede 9 adet heyelan olayı tespit edilirken arazi yüzeyi deformasyon hızının 5.2 cm/yıl ile 57.9 cm/yıl arasında değiştiği gözlemlenmiş ve sonuçlar arazide gerçekleştirilen GNSS gözlemleriyle karşılaştırılarak kontrol edilmiştir (Putri ve ark., 2013). Shirani ve Pasandi (2021), İran'ın Chaharmahal ve Bahtiyari Eyaleti içerisindeki Doab-Samsami havzasındaki aktif heyelan alanlarının belirlenmesi ve izlenmesinde DInSAR yönteminin performansının değerlendirilmesi amacıyla ENVISAT uydusu ASAR (Advanced SAR) algılayıcısından elde edilen 12 adet alçalan yörüngedeki SAR görüntüsünü ve ALOS PALSAR

uydusundan elde edilen 10 adet yükselen yörüngedeki SAR görüntüsünü kullanmışlardır. Görüntülerin işlenmesiyle elde edilen 7 adet ASAR interferogramı ile 10 adet PALSAR interferogramı içerisinde baz hattı dekorelasyonu ve zamansal dekorelasyon gibi kısıtlayıcı unsurlar sebebiyle sadece 3 adet interferogram üretilebilmiş ve 4 adet heyelan olayı tespit edilmiştir (Shirani ve Pasandi, 2021). İtalya'nın Kuzey Apeninler bölgesinde gerçekleşen Santo Stefano d'Aveto heyelanını nitelendirmek ve izlemek amacıyla Tofani ve ark. (2013), hem alçalan hem yükselen yörüngedeki ERS-1/2, ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak PSI analizi gerçekleştirmiş, aynı zamanda eğim ölçer ve basınçölçer gibi yersel tekniklerden de yararlanmışlardır. ERS veri seti kullanılarak gerçekleştirilen PSI analizi için maksimum yer değiştirme hızı değeri 38 mm/yıl olarak ENVISAT için ise 20 mm/yıl olarak tespit edilirken, alandaki heyelan durumu "aktif" ve heyelan hızı "çok yavaş" olarak sınıflandırılmıştır (Tofani ve ark., 2013). 2008 yılında Çin'in Sichuan vilayetinde gerçekleşen 7.9 Mw büyüklüğündeki Wenchuan Depremi sonucunda meydana gelen Daguangbao heyelanına ait deformasyon zaman serilerinin depremden sonraki 10 yıl içindeki değişimini incelemek amacıyla Luo ve ark. (2020), 2008-2011 yılları arasındaki ALOS PALSAR-1 görüntüleri ile 2015-2020 yılları arasındaki Sentinel-1 görüntülerini kullanarak SBAS yöntemiyle depremden sonraki 2 yıl içerisinde ve daha yakın zamanda gerçekleşen heyelan olaylarını incelemişlerdir. İncelemede, toplam 333 adet SAR görüntüsü kullanılırken yakın zamana ait toplam 320 adet Sentinel-1 görüntüsü ve 1217 adet interferogram elde edilmiş, analizler sonucunda deformasyon hızının düşey yönde maksimum ± 80 mm/yıl ve doğu-batı yönünde ortalama ± 35 mm/yıl olduğu tespit edilmiştir (Luo ve ark., 2020). Yerel ölçekte heyelan kaynaklı yer değiştirmelerin tespit edilmesi amacıyla Silvia ve ark. (2013), İtalya'nın Calabria Bölgesindeki Gimigliano bölgesinde TerraSAR-X görüntülerini kullanarak PSI analizi gerçekleştirmiş, bölgeye ait tarihsel deformasyon olaylarını tespit etmek ve hız, durum bakımından incelemek amacıyla önceki yıllara ait ortofotoları, ERS ve ENVISAT ASAR görüntülerini kullanmışlardır. Elde edilen PSI sonuçları incelendiğinde alandaki ortalama deformasyon hızının -30 mm/yıl olduğu tespit edilirken yerleşim olan kısımdaki ortalama yer değiştirme değerlerinin -9 mm/yıl olduğu gözlemlenmiştir (Silvia ve ark., 2013). Çin'in Üç Boğaz (Three Gorges) bölgesinde yer alan Badong vilayetinde gerçekleşen heyelan olaylarının tespit edilmesi için Liu ve ark. (2013), hem yükselen hem alçalan yörüngedeki 85 adet SAR görüntüsünü içeren ENVISAT ASAR veri setini temel alarak SBAS tekniğini kullanmışlardır. Analiz sonucunda bölgenin doğu ve batı kısımlarında olmak üzere 2 adet heyelan olayı tespit edilmiş, farklı yörünge yönelimlerine sahip SAR görüntülerinin kullanılmasıyla kuzey ve düşey yönlü yer değiştirme hareketleri elde edilerek doğudaki heyelan için kuzey yönlü hareket 4-5 mm/yıl, aşağı yönlü hareket 7-12 mm/yıl ve genellikle düşey yönelime sahip olan daha batıdaki heyelan için aşağı yönlü hareket ise 2-3 mm/yıl olarak gözlemlenmiştir (Liu ve ark., 2013). Endonezya'nın Batı Sumatra bölgesinde bulunan, kompleks yüzey topoğrafyası ve jeolojik formasyona

sahip olması sebebiyle arazi deformasyonu olaylarının sıklıkla yaşandığı Kelok Sembilan yolunda heyelan kaynaklı gerçekleşen arazi deformasyonlarının tespit edilmesi amacıyla Razi ve ark. (2018), 13 adet yükselen yörüngedeki ALOS PALSAR görüntüsünü PSI yöntemini kullanarak işlemişlerdir. Yol alanına ait ortalama yer değiştirme hızı -100 mm/yıl olarak tespit edilerek analiz sonuçları insansız hava aracı (İHA) kullanılarak elde edilmiş ortofoto ve yersel GNSS ölçümleriyle ayrı ayrı karşılaştırılmış ve karesel ortalama hatalar 3D ortofoto için ± 1.5 m, GNSS sonuçları için ± 0.97 m olarak elde edilmiştir (Razi ve ark., 2018). Aslan ve ark. (2020), Fransa Alplerinde bulunan 4000 km² alana sahip bir bölgede gerçekleşen yavaş hareketli heyelanların haritalanması ve izlenmesi amacıyla Sentinel-1A/B uydularından elde edilen hem yükselen hem de alçalan yörüngelerdeki SAR görüntülerini kullanarak PSI yöntemini uygulamışlardır. Farklı yörünge özelliklerine sahip SAR görüntüleri PSI yöntemi ile işlenerek heyelan bölgesinde bir araya toplanmış hareketli noktaları içeren 245 adet Aktif Deformasyon Bölgesi (Active Deformation Area – ADA) (Meisina ve ark., 2008; Barra ve ark., 2017) tespit edilmiş ve tespit edilen bölgelerin yavaşlayan bir eğim hareketine (<1.6 cm/yıl) sahip olduğu saptanmıştır (Aslan ve ark., 2020). Heyelan tespiti çalışmalarında SAR uydularının dışında optik veya LiDAR hava sistemlerinden ve yersel ölçme tekniklerinden yararlanılarak çoklu analizler gerçekleştirilebilmektedir. İspanya'nın Alicante Vilayeti içerisindeki Alcoy Şehri'nde bulunan bir köprüyü etkileyen derin tabanlı heyelanın incelenmesi amacıyla Pastor ve ark. (2019), DInSAR, LiDAR ve yersel gözleme dayalı tekniklerden yararlanılarak çoklu veri entegrasyonuna dayalı bir yaklaşım uygulamışlardır. Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen DInSAR analizi sonucunda LOS yönündeki yer değiştirme hızları bazı PS noktaları için ± 3 mm/yıl olurken bu değer -7.43 mm/yıl olduğu noktalar da alanda mevcut olmakla birlikte gerçekleşen heyelan tipi dairesel olarak tespit edilmiştir (Pastor ve ark., 2019). Heyelan tespit çalışmalarında farklı uydu bakış geometrisiyle yer değiştirme miktarı tespit edilebilmektedir. İtalya'da bulunan Apenin Dağları'nın güneyinde konumlanan Latronico yerleşim alanında gerçekleşen heyelan olaylarının izlenmesi için Fornaro ve ark. (2019), COSMO-SkyMed uydu sisteminden elde edilen yüksek çözünürlüklü SAR görüntülerini kullanarak TomoSAR tekniğini uygulamış ve binalarda ve altyapıda oluşan deformasyonları tespit etmişlerdir. Tek bakışlı (Single-look) ve çok bakışlı (Multi-look) gerçekleştirilen analizler sonucunda bölgedeki ortalama yer değiştirme hızının ± 1.2 cm/yıl olduğu gözlemlenmiştir (Fornaro ve ark., 2019).

Heyelan aktivite durumunun incelenmesi ile potansiyel heyelan alanları tespit edilebilmektedir. Heyelan aktivite durumunun sınıflandırmasında bir ön koşul olarak heyelan başına minimum PS sayısına sahip olunması yaklaşımı yerine küme analizi yöntemini kullanan bir PSI metodu sunan Kalia (2018), geliştirilen yöntemin daha güvenilir sonuçlar vereceğini önermiştir. Almanya'nın Moselle Vadisi'nde bulunan yaklaşık 1500 km²'lik alana sahip olan çalışma bölgesine ait Sentinel-1 SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları incelendiğinde 23 adet "aktif, çok

yavaş”, 24 adet “aktif, aşırı yavaş”, 132 adet “inaktif”, 204 adet “sınıflandırılmamış” heyelan türü olduğu tespit edilerek sonuçların bölgeye ait heyelan tehlike haritası ile karşılaştırıldığında yüksek korelasyon gösterdiği gözlemlenmiş ve heyelan tehlike haritasında gösterilen “potansiyel kayma alanları” PSI analizi sonucunda “aktif heyelanlar” olarak sınıflandırılmıştır (Kalia, 2018). Bulunduğu konum dolayısıyla jeolojik açıdan dengesiz bir arazi üzerinde bulunan ve tarih boyunca birçok yıkıcı heyelan olayının yaşandığı La Paz Şehri’nde (Bolivya) gerçekleşen heyelan olaylarının izlenmesi amacıyla Huang Lin ve ark. (2019), Sentinel-1 SAR verisini kullanarak hem PSI hem de SBAS tekniklerini uygulamışlardır. Bölgede farklı aktif heyelan hareketleri gözlemlenirken batı yönlü yer değiştirme hareketinin 158 mm/yıl, doğu yönlü yer değiştirme hareketinin ise 49 mm/yıl olduğu tespit edilmiş, bulgular doğrultusunda alanda gerçekleşen heyelan felaketi öncesindeki aktif hareket belirlenirken başka riskli alanlar da keşfedilmiştir (Huang Lin ve ark., 2019). Potansiyel heyelan alanlarının belirlenmesi afetlerin yıkıcı etkilerine karşı erken uyarı potansiyeli oluşturmakta ve önlem alınması amacıyla planlama çalışmalarına dayanak oluşturmaktadır.

Heyelan tespitinde InSAR yöntemlerinin performanslarının incelenmesi ve artırımı amaçlarıyla farklı uzaktan algılama yöntemleri ile kıyaslamaya dayalı çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. DInSAR, SBAS, PSI gibi InSAR teknikleri ile optik uzaktan algılama tekniğinin birlikte kullanılmasıyla yüksek dağlık alanlarda ve vadi bölgelerinde gerçekleşen heyelan olaylarının erken tespiti için Xichao ve ark. (2020), yüksek dağ-kanyon yeryüzü şekillerinin ve nehir erozyonunun hâkim olduğu Çin’de bulunan Dadu Nehir havzasının Shimian ve Hanyuan şehirleri arasında kalan bölümüne ait hem yükselen hem de alçalan yörüngelerdeki Sentinel-1A SAR görüntülerini kullanmışlardır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda DInSAR, PSI ve SBAS yöntemleriyle sırasıyla 37, 28 ve 86 adet, tespit aşamasında kesişen alanların çıkarılması sonucunda toplam 121 adet heyelan deformasyon bölgesi tespit edilmiş ve yüksek dağlık alanlarda heyelan tespiti açısından SBAS yönteminin en yüksek performansa sahip olduğu gösterilmiştir (Xichao ve ark., 2020). García-Davalillo ve ark. (2014), Tena Vadisi’nde (Orta Pireneler, İspanya) aşırı yavaş şekilde gerçekleşen heyelan olaylarının tespit edilmesinde ve izlenmesinde ALOS PALSAR sisteminin aynı alanda önceki tarihlerde gerçekleştirilen PSI analizleri ile karşılaştırıldığında performansının incelenmesi amacıyla DInSAR yöntemini kullanmışlardır. DInSAR tekniğiyle 4 adet fark interferogramı elde edilerek gerçekleştirilen bölgesel çaptaki heyelan tespit analizleri sonucunda alandaki 9 adet heyelana ait konum, kapsam, yer değiştirme hızları belirlenmiş ve PSI yöntemi ile karşılaştırıldığında DInSAR ile daha hızlı ilerleyen yer değiştirme hareketlerinin (145 cm/yıl) tespit edilebildiği gözlemlenmiştir (García-Davalillo ve ark., 2014). Çin’in Danba Vilayetinde gerçekleşen Jiaju heyelanını izlemek ve gerçekleşen yer değiştirme olaylarını haritalamak amacıyla Dong ve ark. (2018), PSI ve SBAS yöntemlerini birleştirerek geliştirdikleri uyumlu saçıcılar interferometrisi (Coherent Scatterer InSAR-CSI)

tekniğini temel alarak ALOS PALSAR ve ENVISAT ASAR veri setlerinden yararlanmışlardır. PSI ve SBAS teknikleri ile karşılaştırıldığında CSI metodunun özellikle bitki örtüsüne sahip dağlık alanlarda daha iyi performans gösterdiği gözlemlenirken bölgede LOS yönündeki maksimum yer değiştirme miktarının 120 mm/yıl olduğu tespit edilmiş ve sonuçlar yersel GNSS gözlemleriyle karşılaştırılarak karesel ortalama hata değeri ± 10.5 mm/yıl olarak elde edilmiştir (Dong ve ark., 2018). Gilan Vilayeti’nde (İran) bulunan Masouleh Kenti’nde gerçekleşen heyelan olayının incelenmesi amacıyla Mirzaee ve ark. (2017), PSI, SBAS tekniklerinin yanı sıra, yüksek saçıcı yoğunluğu ve interferometrik uyum sağlayan SqueeSAR (Ferretti ve ark., 2011) yöntemini uygulamak üzere 33 adet TerraSAR-X görüntüsü kullanmışlardır. SBAS ve PSI teknikleriyle karşılaştırıldığında SqueeSAR yönteminin heyelan olaylarının tespit edilmesinde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenirken heyelan bölgesinin kuzey, yaşlı ve genç kısımlarına ait maksimum yer değiştirme miktarları sırasıyla -39 mm/yıl, -65 mm/yıl ve -22 mm/yıl olarak tespit edilmiştir (Mirzaee ve ark., 2017). Confuorto ve ark. (2017), İtalya’nın Crotone Şehri’nde bulunan Papanice yerleşim yerinde yoğun yağış sonucu gerçekleşen heyelanın incelenmesi amacıyla 34 adet TerraSAR-X görüntüsü kullanarak SBAS, Uyumlu Pikel Tekniği (Coherence Pixel Technique=CPT) ve Zamansal Alt Bakış Uyuşumu (Temporal Sublook Coherence=TSC) tekniklerini uygulamışlardır. İki farklı yaklaşım sonucunda heyelan alanı tespit edilerek yer değiştirme hızı LOS yönünde 30-40 mm/yıl olarak gözlemlenmiş ve CPT-TSC tekniğinin SBAS ile karşılaştırıldığında eğim hareketlerindeki değişimi daha detaylı analiz edebilme imkânı sunmaktadır (Confuorto ve ark., 2017).

Farklı doğa olaylarının heyelan üzerindeki etkisini incelemek amacıyla da çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmektedir. C ve X-bant SAR görüntüleme sistemlerinin North Island, Yeni Zelanda’da gerçekleşen Taihape heyelan alanına ait yüzey deformasyonlarının incelenmesindeki kabiliyetlerinin araştırılması için Haghshenas Haghghi ve Motagh (2016), ENVISAT ve TerraSAR-X uydularından elde edilen SAR görüntüleriyle SBAS yöntemini uygulamışlardır. İki uydudan elde edilen SBAS sonuçları da heyelanın parmak bölümüne yakın olan aktif alandaki maksimum yer değiştirme miktarının LOS yönünde < 10 mm/yıl olduğu ve bölgede gerçekleşen fırtına olayları ile alandaki yeraltı suyu miktarının yer değiştirme faaliyetleri ile yüksek korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir (Haghshenas Haghghi ve Motagh, 2016).

3.2. Tasman

Yer altında bulunan materyallerin hareketiyle yer yüzeyinin kademeli olarak alçalması veya ani çökmesi sebebiyle gerçekleşen doğa olayı tasman olarak adlandırılmaktadır (Galloway ve ark., 1999). Yer altı suyunun çekilmesi ve çeşitli jeolojik aktiviteler (maden çalışmaları vb.) gibi insan faaliyetleri tasmanın başlıca nedenleri arasında gösterilmektedir (Xue ve ark., 2005). Tasman sonucunda can kaybı ve yaralanmalar yaşanabilirken aynı zamanda maddi hasar da

oluşabilmektedir. Deprem, sel gibi ani gerçekleşen doğal felaketler ile karşılaştırıldığında tasman yavaş ilerleyen bir doğa olayı olsa da bina, yol, elektrik hatları vb. insan yapımı yapılarda ciddi hasarlara yol açabilmektedir (Strozzi ve ark., 2001). Dünya üzerinde tasmanın yoğun olarak gerçekleştiği alanların 1950'li yıllardan itibaren yeraltından çıkarılan su, petrol ve gaz kaynaklarına olan talebin artması sebebiyle oluştuğu tahmin edilmektedir (Hu ve ark., 2004). Bu sebeplerle tasman sonucu oluşan deformasyonun tespit edilmesi, oluşabilecek hasara karşı önlem alınması amacıyla erken uyarı ve müdahale sistemlerinin kurulması için büyük önem arz etmektedir. Denizden arazi kazanımını kapsayan ıslah çalışmalarının yoğun olduğu Çin'in Shenzhen özel ekonomik bölgesinde gerçekleşen tasman miktarının belirlenmesi amacıyla Xu ve ark. (2016), ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak SBAS analizleri gerçekleştirmişlerdir. Islah bölgesinde bulunan havaalanı ve körfez alanlarında yıllık 25 mm'ye kadar ulaşan çökme hızlarının olduğu tespit edilmiştir (Xu ve ark., 2016). Almanya'daki Ren kömür yataklarında bulunan 3 adet açık maden ocağı alanına ait şev stabilitesinin ve deformasyon miktarının tespiti için Tang ve ark. (2020), hem yükselen yörüngedeki hem de alçalan yörüngedeki Sentinel-1A ve TerraSAR-X görüntülerini kullanarak SBAS tekniğini uygulamışlardır. Alanlarda 500 mm/yıl, 380 mm/yıl ve 310 mm/yıl değerlerine ulaşan deformasyon hızları tespit edilirken, sonuçlar tasmanın sebebini araştırmak için alanlara ait yeraltı suyu miktarı ile karşılaştırılmıştır (Tang ve ark., 2020). SBAS tekniği ile gerçekleştirilen tasman kaynaklı deformasyon analizlerinde genellikle fazla sayıda çok zamanlı SAR görüntüsü gerektiği için bu durum erken uyarı sistemleri için müdahale imkanını kısıtlamaktadır. Çin'in Wuhan şehrinde geniş çaplı olarak var olan tasmanın belirlenmesi için Zhou ve ark. (2017), Sentinel-1A uydusunun geniş kapsama alanı ve 12 günlük tekrar görüntüleme aralığı sunan Aşamalı Taramalarla Arazi Gözlemi (The Terrain Observation with Progressive Scans, TOPS) modunda elde edilmiş SAR görüntülerini kullanarak SBAS tekniğini uygulamışlardır. SBAS analizi sonuçları yersel nivelman gözlemleriyle karşılaştırılarak yüksek korelasyon elde edilmiş ve bölgedeki ortalama deformasyon miktarının -82 mm/yıl ile 18 mm/yıl arasında değiştiği tespit edilmiştir (Zhou ve ark., 2017). Aynı bölgede (Wuhan, Çin) gerçekleştirilen geniş zaman aralığına sahip SBAS analizinde RADARSAT-2 görüntüleri kullanılarak deformasyon miktarının -52 mm/yıl ve 28 mm/yıl arasında olduğu saptanmıştır (Zhang ve ark., 2019). İki çalışma incelendiğinde aynı alanda gerçekleştirilen SBAS analizleri sonucunda farklı deformasyon miktarlarının elde edilmesinin sebebi kısa zaman aralığında gerçekleşebilecek tasman olaylarının geniş zamanlı gözlemlerle tespit edilememesidir. SBAS tekniği ile bitki örtüsünün hâkim olduğu kırsal alanlarda yapılan analizlerde, düşük yoğunluk ve düzensiz kapsama alanı gibi problemler tekniğin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu sebeple bitki örtüsüne sahip alanlara ait aralıklı yapıdaki uyum sinyallerini kullanarak arazi hareketinin belirlenmesi prensibine dayanan Aralıklı SBAS (Intermittent SBAS=ISBAS) tekniği geliştirilmiştir (Sowter ve ark., 2013). Gee ve ark. (2016), Hollanda'da gaz üretimi yapılan bir alana ait tasman miktarının tespit edilmesi amacıyla ERS-2 ve ENVISAT ASAR görüntülerini

kullanarak ISBAS tekniğini uygulamışlardır. ISBAS sonuçları ERS ve ENVISAT için referans PSI sonuçlarıyla karşılaştırıldığında karesel ortalama hatalar sırasıyla 1.52 mm/yıl ve 1.13 mm/yıl olarak elde edilmiştir (Gee ve ark., 2016). Bu sonuçlar, ISBAS tekniğinin PSI ile yüksek uyum ortaya koyduğunu ispatlamaktadır.

DInSAR tekniğinin çeşitli sebepler sonucu oluşan tasman olaylarının incelenmesindeki performansını incelemek amacıyla Tomás ve ark. (2014), ALOS PALSAR, TerraSAR-X ve COSMO-SkyMed uydularından yararlanmışlardır. İspanya'da bulunan farklı bölgelerde gerçekleştirilen çalışmada, DInSAR tekniğinin yersel yöntemler ile karşılaştırıldığında geniş alanlarda daha düşük maliyete sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tomás ve ark., 2014). DInSAR yöntemi ile tasmana bağlı deformasyonlar düşük maliyetli olarak belirlense de mekânsal ve zamansal dekorelasyon gibi faz uyuşumunu bozacak etkiler sonuçların doğruluğunu sınırlamaktadır. Öte yandan PSI ve SBAS yöntemi ile bu problemler giderilerek daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Çin'in Shandong vilayetinde bulunan Ge-Ting kömür madeninde gerçekleşen tasmana bağlı deformasyonun tespit edilmesi amacıyla Huang ve ark. (2019), ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak PSI metodundan yararlanmışlardır. Maden alanında yavaş ilerleyen deformasyon hareketleri tespit edilirken yer değiştirme miktarı 0 cm/yıl ile -58 cm/yıl olarak tespit edilmiştir (Huang ve ark., 2019). Luo ve ark. (2014), Çin'in Tianjin kentindeki tasmanın izlenmesi amacıyla yüksek çözünürlüğe sahip TerraSAR-X görüntülerini kullanarak bir PSI analizi gerçekleştirmişlerdir. PSI analizi sonrasında tasmanın yoğun olduğu üç adet merkez alan tespit edilirken deformasyon miktarının -30 mm/yıl ile -60 mm/yıl aralığında değiştiği gözlemlenmiştir (Luo ve ark., 2014). İtalya'nın Toskana bölgesinde gerçekleşen tasman kaynaklı deformasyon miktarının haritalanması amacıyla Rosi ve ark. (2016), farklı yörünge modlarındaki ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak PSI analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, bölgedeki ortalama deformasyon miktarı 10 mm/yıl olarak tespit edilirken kullanılan uydunun aynı alanı tekrar görüntüleme sıklığının 35 gün ve bant genişliğinin 5.66 cm olması sebebiyle 1.44 mm/35 gün değerinden daha hızlı olan deformasyon hareketleri tespit edilememiştir (Rosi ve ark., 2016). Farklı yörünge modlarında elde edilen veriler ile dağlık bölgelerde veya tepelerin yoğun olarak bulunduğu engebeli topoğrafyaya sahip alanlarda deformasyon miktarı tespit edilebilmektedir fakat PSI analizi ile belirlenen deformasyonlar LOS yönünde elde edildiği için gerçek deformasyon değerleri arazinin yönelimine bağlıdır.

PSI ve SBAS yöntemlerinden yararlanarak Springfield şehrinde (Illinois, ABD) gerçekleşen maden çalışması kaynaklı tasmanın belirlenmesi amacıyla Grzovic ve Ghulam (2015), ERS-1/2 ve ALOS PALSAR görüntülerini kullanmışlardır. Maden alanındaki maksimum deformasyon miktarı 1992-2000 yılları arasında -4.1 mm/yıl ve 2007-2011 yılları arasında ise -35.9 mm/yıl olarak tespit edilmiştir (Grzovic ve Ghulam, 2015). Çalışmada üretilen ortalama yer değiştirme hızı haritaları göz önünde bulundurulduğunda PSI sonuçlarındaki nokta yoğunluğunun SBAS ile

karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, çalışma alanında bulunan park, golf sahası gibi PS tayininin çok güç olduğu vejetasyon yoğun alanların etkisiyle oluştuğu düşünülmektedir. Goel ve ark. (2011), Almanya'nın Lueneburg kentinde 1980 yılına kadar süren madencilik faaliyetleri sonucunda gerçekleşen tasmanın izlenmesi amacıyla SBAS ve PSI analizleri gerçekleştirmişlerdir. ERS ve TerraSAR-X veri setleri kullanılarak alandaki deformasyon miktarı tespit edilmiş ve elde edilen sonuçların risk değerlendirmesi için kullanılabilmesine değinilmiştir (Goel ve ark., 2011). Madencilik çalışmalarının dışında bir bölgede gerçekleşen inşaat çalışmaları da insan kaynaklı tasman olaylarının ve yeryüzünde oluşan çatlakların nedenleri arasında gösterilmektedir (Zhao ve ark., 2009). Çin'in Shanxi eyaletinde bulunan Datong şehrinde ekonomik faaliyetler sonucu oluşan tasman olaylarının incelenmesi amacıyla Zhao ve ark. (2011), ENVISAT ASAR görüntülerinden faydalanarak SBAS tekniğini uygulamışlar ve üretilen interferogramlar üzerinde atmosferik etkinin incelenmesi amacıyla MODIS verisinden yararlanmışlardır. Bölgede tasmana neden olan olaylar yeraltı suyu çıkarımı, geniş çaplı inşaat faaliyetleri ve madencilik çalışmaları olarak belirlenirken olayların gerçekleştiği alanlardaki maksimum deformasyon miktarları sırasıyla 2 cm/yıl, 1 cm/yıl ve 4 cm/yıl olarak tespit edilmiştir (Zhao ve ark., 2011). Aynı alanda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada Stanford Sürekli Saçıcılar (StaMPS, Stanford Method for Persistent Scatter) SBAS tekniğini (Hooper ve Zebker, 2007; Hooper, 2008) ve ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak Yang ve ark. (2014), tasmanın yaşandığı bölgenin yıllık ortalama deformasyon haritasını üretmişlerdir. Analiz sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak amacıyla zamansal baz uzunluğu 700 günden kısa ve mekânsal baz uzunluğu ise 500 m'den az olan interferometrik kombinasyonlar seçilerek ortalama yıllık deformasyonun -15.5 mm/yıl-10.4 mm/yıl arasında olduğu tespit edilmiştir (Yang ve ark., 2014). Yeraltı suyunun çıkarılması ile akifer sistemlerinde meydana gelen sıkışma durumu tasmanı tetikleyici unsurlardan biridir (Galloway ve Burbey, 2011). İran'daki Nişabur Ovası'nda bulunan akifer sisteminin sıkışması ile meydana gelen tasman olaylarının incelenmesi amacıyla Dehghani ve ark. (2009), ENVISAT ASAR görüntüleri ile SBAS tekniğini kullanmışlardır. Sonuç olarak alanda maksimum ortalama deformasyon miktarı 19 cm/yıl olarak tespit edilirken SBAS sonuçları ile yersel yöntemlerle elde edilen yeraltı su seviyeleri karşılaştırılmıştır (Dehghani ve ark., 2009). Caló ve ark. (2017), Konya Ovası'nda (Türkiye) gerçekleşen tasmanın tespit edilmesi ve bu olayın bölgedeki yeraltı suyu miktarı ile ilişkisinin incelenmesi amacıyla ENVISAT ASAR verilerini kullanarak DInSAR tekniğini uygulamışlardır. Çalışma sonucunda alandaki maksimum deformasyon miktarının 1.5 cm/yıl, maksimum düşey yöndeki yer değiştirmenin 10 cm olduğu görülürken yeraltı suyu miktarına bağlı olarak tasman olaylarının mekansal ve zamansal olarak değişim gösterdiği gözlemlenmiştir (Caló ve ark., 2017). DInSAR, PSI ve SBAS gibi tekniklerin dışında TomoSAR yöntemi ile bir alandaki ortalama tasman hızını gösteren haritalar üretilmektedir. Ho Tong Minh ve Ngo (2017),

Vietnam'daki Ho Chi Minh şehrindeki tasmanın tespit edilmesi amacıyla Sentinel-1A/B ve COSMO-SkyMed verilerini kullanarak TomoSAR tekniğini uygulamışlardır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda ortalama tasman hızını gösteren haritalar üretilirken bölgedeki ortalama hız değeri maksimum -30 mm/yıl olarak tespit edilmiştir (Ho Tong Minh ve Ngo, 2017).

3.3. Deprem

Yıkıcı doğal afetlerden biri olan depremler can kaybı ve yaralanmalara sebebiyet verirken bina, yol ve altyapılarda ciddi hasarlara neden olup ülke ekonomisine önemli zararlar vermektedir. Her yıl dünya genelinde binlerce kişi deprem sebebi ile hayatını kaybederken oluşan ekonomik kayıp yıllık olarak milyarlarca doları bulmaktadır (Elnashai ve Di Sarno, 2008). Depremler, kırılma yüzeyi boyunca kayaların ani bir biçimde yatay veya düşey yönde hareket etmesiyle fay boyunca biriken gerilmenin sismik enerji şeklinde açığa çıkması doğrultusunda oluşmaktadır (Guha-Sapir ve Vos, 2011). Dünya üzerinde gerçekleşen bazı volkanik aktivitelerin depremleri tetiklediği gözlemlenmektedir (Goto, 1999). Uzaktan algılama içerisindeki uydu sistemleri ve GNSS gözlemleri gibi yersel teknikler birlikte kullanılarak depremler sonucu oluşan deformasyon miktarları tespit edilebilmektedir (Tralli ve ark., 2005). Binalarda oluşan deprem kaynaklı deformasyonların tespit edilmesi ve yıkılan yapıların belirlenmesi amacıyla optik ve SAR uydu sistemlerinden, LiDAR sensörlerinden ve yersel gözlemlerden yararlanılmaktadır (Dong ve Shan, 2013). Bu sayede, deprem sonrası kurtarma ve yeniden yapılanma çalışmaları için gerekli olan deprem kaynaklı bina hasar durumu hakkında bilgi elde edilmektedir (Schweier ve ark., 2004). Kore'de gerçekleşen Gyeongju ($M_w=5.8$) ve Pohang ($M_w=5.4$) depremlerinin merkez üslerine yakın alanda yaşanan sismik hareketlerin aynı bölgedeki Ulsang endüstriyel kompleksine etkisinin izlenmesi amacıyla Yun ve ark. (2019), Sentinel-1 görüntüleri kullanarak DInSAR zaman serileri analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak endüstriyel alanda gerçekleştirilen DInSAR analizi ve yersel GNSS gözlemleriyle sismik kaynaklı 15 mm/yıl hıza ulaşan deformasyon hareketleri tespit edilmiştir (Yun ve ark., 2019). Aynı zamanda bu çalışma ile endüstriyel tesislerde deformasyon kaynaklı gerçekleşebilecek felakete karşı önlem alınması amacıyla afet izleme sistemi kurulması için örnek bir model sunulmuştur.

Deprem tetikleyici fay alanlarının tespit edilmesi ve gerçekleşen kayma miktarının incelenmesi amacıyla çeşitli InSAR teknikleri kullanılmaktadır. De Novellis ve ark. (2018), İtalya'da yaşanan 3.9 M_w büyüklüğündeki Ischia depreminin gerçekleşme sebebini incelemek amacıyla var olan sismolojik veriler ve GNSS ölçmelerinin yanında DInSAR tekniğini kullanmışlardır. Sonuç olarak Sentinel-1 ve COSMO-SkyMed görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen DInSAR analizi ve yersel ölçmeler sonucunda merkezi 800 m derinlikte olan fay bölgesinde maksimum kayma miktarının 14 cm düzeyinde olduğu saptanmıştır (De Novellis ve ark., 2018). DInSAR ile tespit edilen faylar doğrultu, eğim yönü ve hareket çeşidi gibi özellikler açısından

sınıflandırılmaktadır. Aynı zamanda afet bölgelerindeki sismik kaynakların incelenmesi için DInSAR interferogramlarından elde edilen yer değiştirme haritalarından yararlanılmaktadır. Doğu-Azerbaycan (İran) bölgesinde gerçekleşen depremin ($M_w=5.9$) sismik kaynağının geometrisini ve kinematığını incelemek amacıyla Valerio ve ark. (2020), farklı yörünge modlarındaki Sentinel-1 görüntülerini kullanarak DInSAR tekniğini uygulamışlardır. DInSAR ile gerçekleştirilen modelleme çalışmasıyla yaklaşık olarak Kuzeydoğu-Güneybatı doğrultulu, sol yanal doğrultu atımlı ve güneydoğu eğimli bir fay mekanizması tespit edilmiştir (Valerio ve ark., 2020). İtalya'da yaşanan L'Aquila depremi ($M_w=6.3$) sırasında aktifleşen fayın geometrik ve kinematik özelliklerinin incelenmesi amacıyla Atzori ve ark. (2009), ENVISAT ASAR ve COSMO-SkyMed SAR sistemlerini kullanarak DInSAR tekniğinden yararlanmışlardır. Sonuç olarak ~16 km uzunluğunda ve ~12 km genişliğinde, eğimi 47° Güneybatı yönünde olan bir fay mekanizması tespit edilirken, alandaki maksimum kaymanın ~90 cm olduğu gözlemlenmiştir (Atzori ve ark., 2009). DInSAR ile tespit edilen yer değiştirme hareketlerinin incelenmesi ile fay bölgesinde meydana gelen sismik yüzey hareketleri ve kayma miktarları elde edilebilmektedir. Merkez üssü Kathmandu şehrinin (Nepal) Kuzeybatısında bulunan Gorkha depremi ($M_w=7.8$) sonucunda fayda gerçekleşen kaymanın incelenmesi ve sismik yer değiştirme hareketlerinin haritalanması amacıyla Castaldo ve ark. (2017), Sentinel-1A ve ALOS PALSAR-2 görüntülerini kullanarak DInSAR metodundan yararlanmışlardır. DInSAR analizinden elde edilen yer değiştirmelerin modellenmesi ile faydaki kaymanın 7 m'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir (Castaldo ve ark., 2017).

Depremi tetikleyen fay hattında alçalma ve yükselme olarak farklı yönlerde gerçekleşen düşey hareketlerin tespit edilmesi amacıyla farklı yörünge modlarında elde edilmiş SAR görüntülerinden yararlanılmaktadır. İran'da gerçekleşen $7.3 M_w$ büyüklüğündeki deprem sonucunda oluşan tehlikeli arazi ve yapı hareketlerinin DInSAR ile belirlenmesi amacıyla Çomut ve ark. (2020), farklı yörünge modlarında elde edilmiş (alçalan-yükselen) Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanmışlardır. Deformasyon analizi ile fay hattının Güneybatısında alçalmanın -40 cm'den fazla olduğu ve Kuzeydoğusunda yükselmenin 90 cm'yi aştığı tespit edilmiştir (Çomut ve ark., 2020).

Yoğun bitki örtüsü ve mekânsal dekorelasyon etkileri InSAR analizlerinde veri uyumunu noktasında hayati öneme sahiptir. Bu parametrelerin olumsuz etkilerinin giderilmesi ve veri uyumunun iyileştirilmesi amacıyla literatürde çeşitli yöntemler denenmiştir. Örneğin, Syahreza ve ark. (2018), Endonezya'nın Aceh vilayetinde gerçekleşen $6.5 M_w$ büyüklüğündeki depremin neden olduğu deformasyon hareketlerini tespit etmek için Sentinel-1A/B SAR görüntüleri üzerinde DInSAR tekniğini uygulamışlardır. Uygulama sonucunda 12 günlük tekrar görüntüleme aralığına sahip Sentinel-1A/B SAR görüntüleri kullanımının, uyumunun iyileştirilmesi açısından bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır (Syahreza ve ark., 2018). Ayrıca araştırmacılar aynı analizi sadece Sentinel-1A (Tekrar görüntüleme aralığı 24 gün) görüntüleri kullanarak

gerçekleştirmiş ve Sentinel-1A/B sonuçlarına benzer deformasyonların elde edildiği gözlemlenmiştir. Deprem kaynaklı deformasyon tespiti çalışmalarında kullanılan SAR görüntülerinin dalga boyları sonuçların doğruluğunu etkilemektedir. İtalya'nın Abruzzi bölgesinde gerçekleşen $6.3 M_w$ büyüklüğündeki deprem kaynaklı yer değiştirme hareketlerinin tespit edilmesi amacıyla Stramondo ve ark. (2010), COSMO-SkyMed, ALOS PALSAR ve ENVISAT ASAR görüntülerini kullanarak DInSAR tekniğini uygulamışlardır. Üretilen deformasyon haritaları incelendiğinde, diğerleri ile karşılaştırıldığında en küçük dalga boyuna sahip olan COSMO-SkyMed SAR sisteminin dalga boyunun yarısı kadar genel doğruluk değerine ulaştığı tespit edilmiştir (Stramondo ve ark., 2010). İran-İrak sınırında gerçekleşen $7.3 M_w$ büyüklüğündeki deprem sonucunda oluşan yer değiştirme hareketlerini saptamak amacıyla Suresh ve Yarrakula (2020), düşey-düşey (VV) polarizasyonundaki Sentinel-1A SAR görüntülerinden yararlanarak DInSAR tekniğini uygulamışlardır. DInSAR tekniği ile alana ait yer değiştirme hızı haritası üretilerek yer değiştirme miktarının -18 cm ile 85 cm arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Suresh ve Yarrakula, 2020). Sentinel-1A SAR sisteminin kullanıldığı diğer bir çalışmada Nurtyawan ve Yulanda (2020), Lombok Adası'nda (Batı Nusa Tenggara, Endonezya) gerçekleşen depreme ($M_w=6.4$) ait deformasyonların incelenmesi için DInSAR analizi gerçekleştirmişlerdir. Ada bölgesindeki deformasyon miktarı -1 mm ile -134 mm arasında değişirken alan içerisindeki yoğun vejetasyon sebebiyle görüntüler arasında düşük uyum değerleri tespit edilmiştir (Nurtyawan ve Yulanda, 2020).

Deprem sonucunda oluşan yer değiştirme hareketlerinin incelenmesinde depremin anlık yüzey deformasyon etkisini ortaya koyan DInSAR tekniğinin yanı sıra deprem gerçekleşen bölgede uzun zamansal periyotlarda depreme sebep olabilecek işaretlerin incelenebilmesi için PSI ve SBAS tekniklerden de yararlanılmaktadır. Japonya'da gerçekleşen Tohoku depremi ($M_w=9.0$) öncesi ve sonrasındaki yer değiştirme hareketlerinin tespit edilmesi için Ishitsuka ve ark. (2015), deprem öncesinde elde edilmiş ALOS PALSAR ve deprem sonrasında elde edilmiş TerraSAR-X görüntüleriyle PSI tekniğini uygulamışlardır. ALOS görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilen analiz ile alanda 10 mm/yıl tasmana bağlı çökme etkisi tespit edilirken aynı analiz TerraSAR-X görüntüleri üzerinde uygulandığında zeminde 5 mm/yıl kabarma olduğu gözlemlenmiştir (Ishitsuka ve ark., 2015). Krishnan ve ark. (2018), Nepal'de bulunan Kathmandu Havzası'nı etkileyen Gorkha depremi ($M_w=7.8$) sonucunda oluşan sismik yer değiştirme hareketlerinin tespit edilmesi için ALOS PALSAR-1 ve Sentinel-1 SAR sistemlerini kullanarak SBAS tabanlı bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak 3 adet çökme bölgesi tespit edilirken LOS yönündeki kümülatif yer değiştirme miktarı 2007-2010 yılları arasında -3 cm ile -54 cm aralığında ve 2015-2016 yılları arasında 2 cm ile -25 cm aralığında elde edilmiştir (Krishnan ve ark., 2018). SBAS tekniği ile deprem gibi sismik hareketler sonucunda gerçekleşen hem bölgesel hem de yerel ölçekteki deformasyon hareketleri tespit edilebilmektedir. Orta İtalya'da bulunan Umbria bölgesinde gerçekleşen depremler ($M_w=4.5-6.0$) ve

heyelan olayları sonucunda oluşan arazi deformasyonlarının hem bölgesel ölçekte hem de yerel ölçekte incelenmesi amacıyla Guzzetti ve ark. (2009), ERS-1/2 SAR görüntülerini kullanarak SBAS tekniğini uygulamışlardır. İlk olarak düşük çözünürlükteki (80 m x 80 m) çok bakışlı interferogramlar kullanılarak deprem sonucunda oluşan deformasyon batı yönünde 3 cm'den fazla ve düşey yönde ise 2 cm'ye yakın olarak elde edilmiştir. Sonrasında ise yüksek çözünürlüklü (4 m x 20 m) tek bakışlı interferogramlar kullanılarak daha küçük ölçekte gerçekleşen deformasyonların belirli bir kısmı tespit edilmiştir (Guzzetti ve ark., 2009). Çalışma bulguları incelendiğinde orta büyüklükteki ($M_w=4.7$) depremlerin tetiklediği yer değiştirme hareketlerinin SBAS tekniği ile tespit edilebildiği görülmüştür. Martins ve ark. (2020), Timor-Leste (Doğu Timor) içerisinde bulunan yerel ölçekteki bir heyelan alanında gerçekleşen deprem ve yoğun yağış kaynaklı yüzey deformasyonlarının tespit edilmesi amacıyla yatay-yatay (HH) polarizasyonundaki ALOS PALSAR-1/2 görüntülerini kullanarak SBAS tekniğini uygulamışlar ve İHA hava fotoğraflarından yararlanmışlardır. Çalışmada, ALOS PALSAR-1/2 verileri için maksimum mekânsal ve zamansal baz uzunlukları sırasıyla ± 2000 m, ± 400 m ile 270 gün, 365 gün olan interferogramlar kullanılarak sırasıyla 15 m x 15 m, 10 m x 10 m çözünürlüğünde deformasyon haritaları üretilmiş ve alanda cm düzeyinde deformasyonlar tespit edilmiştir (Martins ve ark., 2020). ALOS PALSAR gibi L-bant SAR sistemlerinin daha küçük dalga boyuna sahip Sentinel-1 (C-bant) ya da TanDEM-X, COSMO-SKYMed (X-bant) gibi SAR sistemleri ile karşılaştırıldığında bitki penetrasyon kabiliyeti gibi avantajları bulunurken yüzey hareketlerinin tespitinde daha düşük hassasiyet gibi dezavantajları da vardır (Sandwell ve ark., 2008). Dünya üzerinde belirli zaman aralıklarıyla gerçekleşen depremlerin birbirlerini tetiklediği durumlar görülebilmektedir (Freed, 2005). Gerçekleşen iki deprem arasındaki mekânsal ve zamansal ilişkilerin incelenmesi SBAS tekniğinin uygulama alanlarından birisidir. Yeni Zelanda'da gerçekleşen Darfield (7 Eylül 2010, $M_w=7.1$) ve Christchurch (22 Şubat 2011, $M_w=6.1$) depremleriyle ilişkili yer kabuğu deformasyonunun tespit edilmesi amacıyla Salvi ve ark. (2012), ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR ve COSMO-SkyMed sistemlerine ait SAR görüntüleriyle DInSAR ve SBAS tekniklerini uygulamışlardır. Sonuç olarak, deprem bölgesindeki yüzey deformasyonunun deprem öncesinde ve sonrasında zamansal değişimi tespit edilerek iki deprem arasındaki sismik dalga sinyallerinin mekânsal ve zamansal korelasyonu tespit edilmiştir (Salvi ve ark., 2012).

3.4. Volkanik Aktivite

Volkanik patlamalar gibi doğal afetlerin zaman ve büyüklük bakımından tahmin edilmesi, volkanik aktivite risk değerlendirmesi ve oluşabilecek hasarlara karşı önlem alınması açısından önem arz etmektedir (SESWG Report, 2002). GNSS ve InSAR teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen yüksek çözünürlüğe sahip dijital yükseklik modelleri (DEM) ve deformasyon haritaları kullanılarak volkanik aktivite

izleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir (Tralli ve ark., 2005). Üretilen DEM verileri kullanılarak volkanik aktiviteler sonucu oluşabilecek riskler değerlendirilmekte ve volkanik lav akışına ait mekanizma modellenerek kestirim yapılmaktadır (Stevens ve ark., 2003; Glaze ve Baloga, 2003). Stevens ve ark. (2003), Yeni Zelanda'da bulunan Ruapehu ve Taranaki volkanlarında DEM doğruluğunun LAHARZ (Schilling, 1998) volkanik lav akış modelinin çalışma performansına etkisinin incelenmesi amacıyla NASA tarafından gerçekleştirilen hava kaynaklı Topoğrafik SAR (Topographic SAR-TOPSAR) misyonuna ait görüntüleri kullanmışlardır. InSAR DEM verileri kullanılarak volkanik patlama sonucunda ortaya çıkabilecek lavın hacmi de tahmin edilebilmektedir. Alaska'da yer alan Okmok volkanının patlaması sonucunda açığa çıkan lava ait hacmin kestirimi için Lu ve ark. (2003), patlama öncesine ait uzay kaynaklı ERS-1/2 görüntülerini ve patlama sonrasında kapsayan hava kaynaklı TOPSAR görüntülerini kullanarak iki farklı DEM üretmişlerdir. DInSAR ve SBAS teknikleri kullanılarak üretilen interferogramlar üzerinde gerçekleştirilen analizler ile volkanik alanlardaki yer değiştirme miktarı, ortalama lav kalınlığı ve hacim artışı tespit edilebilmektedir. Barren Adası'nda (Hindistan) bulunan yanardağa ait yüzey deformasyonlarının incelenmesi amacıyla Sreejith ve ark. (2020), Sentinel-1 ve ALOS PALSAR-1/2 görüntülerini kullanarak SBAS analizi gerçekleştirmişlerdir. Alanda LOS yönünde -50 mm/yıl deformasyon gözlemlenirken üretilen topoğrafik değişim haritası incelendiğinde 0.87 km²'lik alandaki ortalama lav kalınlığının 13.8 m olduğu ve akışkan lav hacminin ~12 milyon m³ değerinde arttığı gözlemlenmiştir (Sreejith ve ark., 2020). Peru'da bulunan aktif durumdaki Sabancaya yanardağındaki patlama ve sonrasında gerçekleşen depremlere ait deformasyonların izlenmesi amacıyla Boixart ve ark. (2020), hem yükselen hem de alçalan yörengede modlarındaki Sentinel-1 görüntülerini kullanarak DInSAR tekniğini uygulamışlar ve yersel GNSS gözlemlerinden yararlanmışlardır. Sonuç olarak, deformasyon bölgesinde 35 mm/yıl-50 mm/yıl arasında yükselme gözlemlenirken hacim değişim oranının 26×10^6 m³/yıl ile 43×10^6 m³/yıl değerleri arasında değiştiği tespit edilmiştir (Boixart ve ark., 2020). Japonya'da bulunan Aso ve Sakurajima yanardağlarına ait yer değiştirme hareketlerinin tespit edilmesi amacıyla Tessari ve ark. (2019), ALOS PALSAR-2 ve Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanarak SBAS analizi gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda volkanik bölgelere ait yer değiştirme hızları tespit edilirken Sakurajima yanardağına ait hacim değişiminin 1.5×10^6 m³ olduğu görülmüştür (Tessari ve ark., 2019). Miyakejima yanardağında (Japonya) gerçekleşen yüzey deformasyonlarının haritalanması amacıyla Alimuddin ve ark. (2011), ALOS PALSAR verileriyle DInSAR tekniğinden yararlanmışlardır. DInSAR sonuçları incelendiğinde, yüzey deformasyonu miktarının LOS yönünde ± 5.9 cm olduğu tespit edilmiştir (Alimuddin ve ark., 2011). Dünya üzerinde gerçekleşen volkanik aktivite ve deprem gibi sismik olaylar arasındaki ilişkilerin incelenmesinde SAR görüntüleri sıklıkla kullanılmaktadır. Etna Yanardağı'ndaki patlama ve

beraberinde gerçekleşen depreme ($M_w=4.9$) ait yer değiştirme hareketlerinin izlenmesi amacıyla De Novellis ve ark. (2019), Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanarak DInSAR tekniğini uygulamışlardır. Sismik veriler ve DInSAR ile elde edilen yer değiştirme miktarları değerlendirildiğinde bölgedeki fay aktivasyonunun volkanik magma hareketi doğrultusunda yaşanan deformasyon sonucunda gerçekleştiği kabul edilmektedir (De Novellis ve ark., 2019). Volkanik alanlarda deformasyon tespiti gerçekleştirilirken kullanılan SAR sisteminin dalga boyu ve alanda bulunan bitki yoğunluğu gibi parametreler görüntü çiftleri arasındaki uyum değerlerini etkilemektedir. Roa ve ark. (2021), SAOCOM-1A SAR sisteminin interferometrik kabiliyetlerinin değerlendirilmesi amacıyla Domuyo yanardağı bölgesine (Arjantin) ait SAOCOM-1A ve Sentinel-1 verileri kullanılarak DInSAR tekniği ile üretilen deformasyon haritalarını karşılaştırmışlardır. Sentinel-1 ile karşılaştırıldığında SAOCOM-1A sonuçlarının özellikle yoğun bitki örtüsüne sahip alanlarda daha yüksek uyuma sahip olduğu gözlemlenmiştir. SAOCOM-1A zamansal çözünürlüğünün (16 gün) Sentinel-1 (12 gün) ile karşılaştırıldığında daha düşük olmasına rağmen daha yüksek uyumun elde edilmesi L-bant SAR sistemlerinin C-bant'a göre daha yüksek bitki penetrasyonuna sahip olması ile açıklanmaktadır (Roa ve ark., 2021).

3.5. Sel

Kısa süre içinde gerçekleşen yoğun yağış ile akarsularda yaşanan deşarj olayı sonucunda yaşanan seller yerleşim alanlarında can ve mal kaybına sebebiyet vermekte altyapıda ve ekili alanlarda ciddi hasarlar meydana getirmektedir (Sanyal ve Lu, 2004). Dünya üzerinde yaşanan sel olaylarının sıklığının artmasının ana sebeplerinden biri iklim değişikliği sonucunda sıcaklık değerlerindeki artış olarak görülmektedir (Hirabayashi ve ark., 2013). Sel etki alanının tespit edilmesi, afet alanındaki hasarın değerlendirilmesi ve sel risk alanlarının belirlenmesi amacıyla optik ve SAR uydu sistemlerinden elde edilen görüntülerden ve hava fotoğraflarından yararlanılmaktadır (Klemas, 2015). Sel alanlarında uzaktan algılama verileriyle gerçekleştirilen tespit çalışmalarında genel olarak sel olayı öncesi, sırası ve sonrasında olmak üzere farklı zamanlarda elde edilmiş veriler kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2002). MT-DInSAR yöntemlerinden olan SBAS tekniği ile sel kaynaklı yer değiştirme hareketleri tespit edilmekte ve sel riski altındaki alanların belirlenmesi için çeşitli analizler yapılabilmektedir. İran'da Pol-e-Dokhtar şehrinde yaşanan sel olayı sonucunda gerçekleşen yer değiştirme hareketlerinin izlenmesi amacıyla Mehrabi (2021), Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanarak SBAS tekniğini uygulamıştır. Sel olayı öncesinde, sırasında ve sonrasında olmak üzere farklı zamanlarda elde edilen verilerle gerçekleştirilen analiz sonucunda bölgede -1.1 mm/günlük hızında yer değiştirme hareketleri tespit edilmiştir (Mehrabi, 2021). Gao ve ark. (2021), Malezya'daki Penang Adası'nda tasman olaylarını inceleyip deniz seviyesinin artması durumunda sel riski altında kalabilecek alanları tespit etmek amacıyla Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanarak SBAS

teknikinden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda, deniz seviyesindeki artışı gösteren projeksiyonlar ve üretilen tasman modelleri birleştirilip gerçekleştirilen analiz ile sel riski altındaki alan miktarının deniz seviyesindeki artmanın en az olması durumunda %2.0, en fazla olması durumunda ise %5.9 oranında artacağı ortaya konmuştur (Gao ve ark., 2021). Tunus'ta yaşanan sel felaketleri sonucunda oluşan toprak hareketlerinin tespit edilmesi amacıyla Chaabani ve ark. (2020), Sentinel-1 verilerini kullanarak paralel SBAS yaklaşımını (P-SBAS) uygulamışlardır. Casu ve ark. (2014) tarafından geliştirilen P-SBAS tekniğinin geleneksel SBAS tekniğine kıyasla daha büyük boyuta sahip kompleks verilerin işlenmesinde yüksek çalışma verimliliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, P-SBAS tekniği kullanılarak çok zamanlı olarak gerçekleştirilen analizler doğrultusunda sel sonrası ortalama yer değiştirme hızlarını gösteren bir harita üretilebilmiştir (Chaabani ve ark., 2020). SBAS dışında bir diğer MT-DInSAR yöntemi olan PSI tekniği ile sel yaşanan alanları gösteren haritalar üretilmekte ve taşkın duyarlılık analizleri gerçekleştirilmektedir. Wangchuk ve ark. (2022), buzul göllerinde taşkın duyarlılık analizi gerçekleştirmek amacıyla Bhutan Himalayalar bölgesine ait Sentinel-1 SAR verilerini kullanarak PSI tekniğini uygulamışlardır. Taşkın duyarlılık analizi kapsamında bölgedeki radar sinyali geri saçılım yoğunlukları incelenerek buzul erime bölgesi, göldeki buzul alanı gibi parametreler belirlenirken PSI analizi ile göllerin çevresindeki morenlere (buzul taşı) ve yamaçlara ait şev stabilitesi incelenmiştir (Wangchuk ve ark., 2022). Somali'de gerçekleşen sel olayı sonrasında şehir alanları içerisinde selden etkilenen bölgelerin tespit edilmesi amacıyla Pulvirenti ve ark. (2021), Sentinel-1 verilerini kullanarak PSI analizi uygulamışlardır. PSI analizi ile sel yaşanan alanları gösteren harita üretilmiş ve harita içerisindeki alanlar tamamen sel altında kalmış ve kısmi olarak sel altında kalmış olmak üzere sınıflandırılmıştır (Pulvirenti ve ark., 2021). Cheng ve ark. (2019), Laos'ta bulunan Xe-Pian nehri üzerindeki barajın çökmesi sonucunda yaşanan selden etkilenen alanların tespit edilmesi ve yıkılma öncesinde baraj üzerindeki deformasyonların izlenmesi amacıyla Sentinel-1 SAR görüntülerini kullanarak PSI analizi gerçekleştirmişlerdir. PSI analizi sonucunda arazideki deformasyon -25 mm/yıl ile -10 mm/yıl değerleri arasında baraj yüzeyindeki deformasyon ise -10 mm/yıl ile 5 mm/yıl değerleri arasında tespit edilmiş ve sel altında kalan alanları gösteren bir harita üretilmiştir (Cheng ve ark., 2019).

4. Sonuçlar

DInSAR, PSI, SBAS, TomoSAR vb. InSAR yöntemlerinin heyelan, tasman, deprem, volkanik aktivite ve sel gibi doğal afetlerin gerçekleştiği ya da gerçekleşme potansiyelinin olduğu bölgelerdeki kullanımı, afet öncesinde riskli alanların belirlenmesi, afet sonrasında etki analizleri, hasar tespitleri ve süreç yönetimi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca, SAR sistemlerinin afetler için oluşturulan erken uyarı sistemlerine dahil edilmesinin ve risk haritalamasının afet hasarının en aza indirgenmesi açısından önemli bir adım olacağı açıktır. Bu çalışmada,

afet erken uyarı, tespit, izleme ve yönetiminde kullanılan InSAR teknolojileri kapsamında bir literatür araştırması gerçekleştirilmiştir. Literatürel çalışmalar özelinde, incelenen doğal afet, uygulanan InSAR yöntemi, yararlanılan SAR uydu sistemi ve çalışma sonucunda elde edilen bulgular hakkında bilgiler sunulmuştur.

Afet izleme için uygun SAR uydu sisteminin belirlenmesinde incelenen doğal afet türünün ve çalışma alanı özelliklerinin önemli rol oynadığı, buna bağlı olarak kullanılan SAR sistemlerinin dalgaboyu, mekansal ve zamansal çözünürlük gibi parametrelerinin farklılık gösterdiği ortaya konmuştur. Ayrıca, L-bant gibi yüksek dalga boyuna sahip SAR sistemlerinin daha iyi bitki penetrasyon kabiliyeti gibi avantajları yanında doğal afet kaynaklı yer hareketlerinin tespitindeki hassasiyetlerinin C ve X-bant algılayıcılara nazaran daha düşük seviyede kalabildiği belirtilmiştir. Keza, incelenen bazı çalışmalarda yavaş ilerleyen yer değiştirme hareketlerinin yüksek dalga boyuna sahip SAR sistemlerinden yararlanılarak tespit edilemediği ortaya konmuştur.

Afetlere karşı önlem alınması ve karar vericiler tarafından uygun afet yönetimi politikalarının oluşturulması açısından SAR uydu sistemlerinin ve InSAR yöntemlerinin afet çalışmalarında kullanılması çok önemlidir. InSAR yöntemleri ile riskli bölgelerin tespiti ve erken uyarı sistemlerinin kurulması için gerekli verilerin hassas ve hızlı bir şekilde elde edilebileceği aşikardır. Ayrıca, gerçekleşen afetlerin yayılım alanının, yarattıkları yüzey deformasyon miktarının ve hasar görmüş alanların tespit edilmesinde de InSAR teknolojisinin kullanımı vazgeçilmez bir gereklilik haline gelmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada sunulan literatürde çok fazla sayıda farklı coğrafyada InSAR uygulamalarının yapıldığının tespiti bu teknolojinin dünya çapında geçerliliğinin ne denli yüksek olduğunun bir diğer açık göstergesidir. Gelecekte gerçekleştirilecek yeni ve daha gelişmiş SAR uydu misyonları sayesinde farklı görüntüleme bantlarında elde edilebilecek daha yüksek mekansal ve zamansal çözünürlüğün InSAR tekniklerinin afet çalışmalarında daha etkin şekilde kullanımının önünü açacağı öngörülmektedir.

Araştırmacıların katkı oranı

Yazarlar, literatür araştırması ve makale yazımında eşit katkı sahibidir.

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

Akgül, M. A. (2018). Sentetik açıklıklı radar verilerinin taşkın çalışmalarında kullanılması: Berdan Ovası Taşkını. *Geomatik*, 3(2), 154-162.

Alcántara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124.

Alimuddin, I., Bayuaji, L., Sumantyo, J. T. S., & Kuze, H. (2011). Surface deformation monitoring of

Miyakejima volcano using DInSAR technique of ALOS PALSAR images. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 24-29 July 2011, Vancouver, BC, Canada, 1615-1618.

Altunel, A. O. (2023). The effect of DEM resolution on topographic wetness index calculation and visualization: An insight to the hidden danger unraveled in Bozkurt in August, 2021. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2), 165-172.

Aslan, G., Foumelis, M., Raucoules, D., De Michele, M., Bernardie, S., & Cakir, Z. (2020). Landslide mapping and monitoring using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique in the French Alps. *Remote Sensing*, 12(8), 1305.

Atzori, S., Hunstad, I., Chini, M., Salvi, S., Tolomei, C., Bignami, C., Stramondo, S., Trasatti, E., Antonioli, A., & Boschi, E. (2009). Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy). *Geophysical Research Letters*, 36(15), 1-6.

Bahadır, M., Ocak, F., & Şen, H. (2024). Determination of the development of settlements above earthquake susceptibility classes in Atakum district (Samsun/Türkiye). *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(3), 390-405.

Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1.

Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O., Bianchini, S., Herrera, G., Crosetto, M., Sarro, R., González-Alonso, E., Mateos, R. M., Ligüerzana, S., López, C., & Moretti, S. (2017). A methodology to detect and update active deformation areas based on Sentinel-1 SAR images. *Remote Sensing*, 9(10), 1002.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375-2383.

Boixart, G., Cruz, L. F., Miranda Cruz, R., Euillades, P. A., Euillades, L. D., & Battaglia, M. (2020). Source model for Sabancaya volcano constrained by DInSAR and GNSS surface deformation observation. *Remote Sensing*, 12(11), 1852.

Caló, F., Notti, D., Galve, J. P., Abdikan, S., Görüm, T., Pepe, A., & Balık Şanlı, F. (2017). DInSAR-based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote Sensing*, 9(1), 83.

Castaldo, R., De Novellis, V., Solaro, G., Pepe, S., Tizzani, P., De Luca, C., Bonano, M., Manunta, M., Casu, F., Zinno, I., & Lanari, R. (2017). Finite element modelling of the 2015 Gorkha earthquake through the joint exploitation of DInSAR measurements and geologic-structural information. *Tectonophysics*, 714, 125-132.

Casu, F., Elefante, S., Imperatore, P., Zinno, I., Manunta, M., De Luca, C., & Lanari, R. (2014). SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3285-3296.

Casu, F., Manzo, M., & Lanari, R. (2006). A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for

- surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4), 195-210.
- Cenni, N., Fiaschi, S., & Fabris, M. (2021). Integrated use of archival aerial photogrammetry, GNSS, and InSAR data for the monitoring of the Patigno landslide (Northern Apennines, Italy). *Landslides*, 18(6), 2247-2263.
- Chaabani, C., Barbouchi, M., & Abdelfattah, R. (2020). Post-flood surface deformation analysis using P-SBAS-DInSAR Sentinel-1 processing in the north of Tunisia. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 26 September-02 October 2020, Waikoloa, HI, USA, 1003-1006.
- Chen, D., Chen, H., Zhang, W., Cao, C., Zhu, K., Yuan, X., & Du, Y. (2020). Characteristics of the residual surface deformation of multiple abandoned mined-out areas based on a field investigation and SBAS-InSAR: A case study in Jilin, China. *Remote Sensing*, 12(22), 3752.
- Cheng, S., Zhao, W., & Yin, Z. (2019). PS-InSAR analysis of collapsed dam and extraction of flood inundation areas in Laos using Sentinel-1 SAR images. *IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*, 20-22 December 2019, Chengdu, China, 2605-2608.
- Chuvieco, E., & Congalton, R. G. (1989). Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 29(2), 147-159.
- Cloude, S. R., & Papathanassiou, K. P. (1998). Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(5), 1551-1565.
- Confuorto, P., Di Martire, D., Centolanza, G., Iglesias, R., Mallorqui, J.J., Novellino, A., Plank, S., Ramondini, M., Thuro, K., & Calcaterra, D. (2017). Post-failure evolution analysis of a rainfall-triggered landslide by multi-temporal interferometry SAR approaches integrated with geotechnical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 188, 51-72.
- Costanzo, S., Massa, G. D., Costanzo, A., Borgia, A., Raffo, A., Viggiani, G., & Versace, P. (2016). Software-defined radar system for landslides monitoring. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 445, 325-331.
- Crippa, C., Valbuzzi, E., Frattini, P., Crosta, G. B., Spreafico, M. C., & Agliardi, F. (2021). Semi-automated regional classification of the style of activity of slow rock-slope deformations using PS InSAR and SqueeSAR velocity data. *Landslides*, 18(7), 2445-2463.
- Crosetto, M., & Pasquali, P. (2008). DSM generation and deformation measurement from SAR data. In *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book*, 175-186.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., & Crippa, B. (2010). Persistent scatterer interferometry: potential, limits and initial C- and X-band comparison. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(9), 1061-1069.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In *Landslides, investigation and mitigation*. Edited by A. K. Turner and R. L. Schuster. Transportation Research Board, Special Report, 247, 36-75.
- Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar*. Wiley, New York, NY, USA.
- Çomut, F. C., Gürboğa, Ş., & Smail, T. (2020). Estimation of co-seismic land deformation due to Mw 7.3 2017 earthquake in Iran (12 November 2017) using Sentinel-1 DInSAR. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 162(162), 11-30.
- Dai, C., Li, W., Wang, D., Lu, H., Xu, Q., & Jian, J. (2021). Active Landslide Detection Based on Sentinel-1 Data and InSAR Technology in Zhouqu County, Gansu Province, Northwest China. *Journal of Earth Science*, 32(5), 1092-1103.
- De Novellis, V., Atzori, S., De Luca, C., Manzo, M., Valerio, E., Bonano, M., Cardaci, C., Castaldo, R., Di Bucci, D., Manunta, M., Onorato, G., Pepe, S., Solaro, G., Tizzani, P., Zinno, I., Neri, M., Lanari, R., & Casu, F. (2019). DInSAR analysis and analytical modeling of Mount Etna displacements: The December 2018 volcano-tectonic crisis. *Geophysical Research Letters*, 46(11), 5817-5827.
- De Novellis, V., Atzori, S., Serpelloni, E., De Luca, C., Berardino, P., Bonano, M., Manunta, M., Manzo, M., Tizzani, P., Solaro, G., Pepe, S., Sansosti, E., Lanari, R., & Casu, F. (2018). The 21 August 2017 Ischia (Italy) earthquake source model inferred from seismological, GPS, and DInSAR measurements. *Geophysical Research Letters*, 45(5), 2193-2202.
- Dehghani, M., Valadan Zoej, M. J., Entezam, I., Mansourian, A., & Saatchi, S. (2009). InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophysical Journal International*, 178(1), 47-56.
- Dong, J., Zhang, L., Tang, M., Liao, M., Xu, Q., Gong, J., & Ao, M. (2018). Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiayu landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 205, 180-198.
- Dong, L., & Shan, J. (2013). A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 84, 85-99.
- Elnashai, A., & Di Sarno, L. (2008). *Fundamentals of earthquake engineering*. New York, Wiley.
- EM-DAT, (2021). EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database, Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium.
- Eraslan, S., Hatipoğlu, İ. K., Ocak, F., Işık, F., & Zeybek, H. İ. (2024). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde yıkılan binalar ile zemin ilişkisinin incelenmesi ve depremde yıkıma uğrama riski analizi. *Geomatik*, 9(2), 207-226.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460-3470.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Fornaro, G., Reale, D., Di Maio, C., Gioia, D., Schiattarella, M., & Vassallo, R. (2019). Monitoring of urban landslides with very high resolution data: the case

- study of Latronico. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 28 July-02 August 2019, Yokohama, Japan, 2092-2094.
- Freed, A. M. (2005). Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 335-367.
- Fruneau, B., Achache, J., & Delacourt, C. (1996). Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3-4), 181-190.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States. US Geological Survey, Circular 1182.
- Gao, G., San, L. H., & Zhu, Y. (2021). Flood inundation analysis in Penang Island (Malaysia) based on InSAR maps of land subsidence and local sea level scenarios. *Water*, 13(11), 1518.
- García-Davalillo, J. C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., & Álvarez-Fernández, I. (2014). DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslides*, 11(2), 225-246.
- Gee, D., Sowter, A., Novellino, A., Marsh, S., & Gluyas, J. (2016). Monitoring land motion due to natural gas extraction: Validation of the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm over gas fields of North Holland, the Netherlands. *Marine and Petroleum Geology*, 77, 1338-1354.
- Glaze, L. S., & Baloga, S. M. (2003). DEM flow path prediction algorithm for geologic mass movements. *Environmental & Engineering Geoscience*, 9(3), 225-240.
- Goel, K., Parizzi, A., & Adam, N. (2011). Salt mining induced subsidence mapping of Lueneburg (Germany) using PSI and SBAS techniques exploiting ERS and TerraSAR-X data. In Proc. FRINGE Workshop, 19-23 September 2011, Frascati, Italy.
- Goto, A. (1999). A new model for volcanic earthquake at Unzen Volcano: Melt rupture model. *Geophysical Research Letters*, 26(16), 2541-2544.
- Grzovic, M., & Ghulam, A. (2015). Evaluation of land subsidence from underground coal mining using TimeSAR (SBAS and PSI) in Springfield, Illinois, USA. *Natural Hazards*, 79(3), 1739-1751.
- Guha-Sapir, D., & Vos, F. (2011). Earthquakes, an epidemiological perspective on patterns and trends. In R. Spence, E. So, & C. Scawthorn (Eds.), *Human casualties in earthquakes: Progress in modelling and mitigation*, Springer, 14-29.
- Gull, A., Liaqut, A., & Mahmood, S. (2023). Landslide risk assessment using geo-spatial technique: A study of District Abbottabad, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Advanced Geomatics*, 3(2), 47-55.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: A case study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy. *Environmental Management*, 25(3), 247-263.
- Guzzetti, F., Manunta, M., Ardizzone, F., Pepe, A., Cardinali, M., Zeni, G., Reichenbach, P., & Lanari, R. (2009). Analysis of ground deformation detected using the SBAS-DInSAR technique in Umbria, Central Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 166(8-9), 1425-1459.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Haghshenas Haghghi, M., & Motagh, M. (2016). Assessment of ground surface displacement in Taihape landslide, New Zealand, with C-and X-band SAR interferometry. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 59(1), 136-146.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821.
- Ho Tong Minh, D., & Ngo, Y. N. (2017). TomoSAR platform supports for Sentinel-1 TOPS persistent scatterers interferometry. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 23-28 July 2017, Fort Worth, TX, USA, 1680-1683.
- Hong, Y., Adler, R., & Huffman, G. (2006). Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 33(22), 1-17.
- Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16), L16302.
- Hooper, A., & Zebker, H. A. (2007). Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *JOSA A*, 24(9), 2737-2747.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611.
- Hossain, F., & Anagnostou, E. N. (2004). Assessment of current passive-microwave- and infrared-based satellite rainfall remote sensing for flood prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D7), 1-14.
- Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. U., & Wang, S. J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1-2), 65-77.
- Huang Lin, C., Liu, D., & Liu, G. (2019). Landslide detection in La Paz City (Bolivia) based on time series analysis of InSAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17), 6775-6795.
- Huang, C., Xia, H., & Hu, J. (2019). Surface deformation monitoring in coal mine area based on PSI. *IEEE Access*, 7, 29672-29678.
- Iqbal, A., & Mahmood, S. (2023). GLOF hazard assessment using geospatial techniques in Hunza Nagar, Gilgit Baltistan, Pakistan. *Advanced Geomatics*, 3(2), 40-46.
- Ishitsuka, K., Prats-Iraola, P., & Nannini, M. (2015). ALOS/PALSAR and TerraSAR-X persistent scatterer

- interferometry around Tokyo: interferometric phase evaluation and validation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 26-31 July 2015, Milan, Italy, 1421-1424.
- Jamil, M., Mahmood, S., Hussain, S., & Saad, M. (2024). Assessing the impact of drought on groundwater resources using geospatial techniques in Balochistan Province, Pakistan. *Advanced Remote Sensing*, 4(1), 11-27.
- Jebur, M. N., Pradhan, B., & Tehrany, M. S. (2015). Using ALOS PALSAR derived high-resolution DInSAR to detect slow-moving landslides in tropical forest: Cameron Highlands, Malaysia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(8), 741-759.
- Kadı, F., & Yilmaz, O. S. (2024). Determination of alternative forest road routes using produced landslide susceptibility maps: A case study of Tonya (Trabzon), Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 9(2), 147-164.
- Kalia, A. C. (2018). Classification of landslide activity on a regional scale using persistent scatterer interferometry at the Moselle valley (Germany). *Remote Sensing*, 10(12), 1880.
- Klemas, V. (2015). Remote sensing of floods and flood-prone areas: an overview. *Journal of Coastal Research*, 31(4), 1005-1013.
- Krishnan, P. S., Kim, D. J., & Jung, J. (2018). Land subsidence monitoring in the Kathmandu Basin, before and after MW 7.8 Gorkha earthquake, Nepal by SBAS-DInSAR technique. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 22-27 July 2018, Valencia, Spain, 525-528.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J. J., Berardino, P., & Sansosti, E. (2004). A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7), 1377-1386.
- Lindell, M. K., & Prater, C. S. (2003). Assessing community impacts of natural disasters. *Natural Hazards Review*, 4(4), 176-185.
- Liu, D., Shao, Y., Liu, Z., Riedel, B., Sowter, A., Niemeier, W., & Bian, Z. (2014). Evaluation of InSAR and TomoSAR for monitoring deformations caused by mining in a mountainous area with high resolution satellite-based SAR. *Remote Sensing*, 6(2), 1476-1495.
- Liu, P., Li, Z., Hoey, T., Kincal, C., Zhang, J., Zeng, Q., & Muller, J. P. (2013). Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the Three Gorges region, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 253-264.
- Loayza, N. V., Olaberria, E., Rigolini, J., & Christiaensen, L. (2012). Natural disasters and growth: Going beyond the averages. *World Development*, 40(7), 1317-1336.
- Lombardini, F. (2005). Differential tomography: A new framework for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), 37-44.
- Lu, P., Casagli, N., Catani, F., & Tofani, V. (2012). Persistent Scatterers Interferometry Hotspot and Cluster Analysis (PSI-HCA) for detection of extremely slow-moving landslides. *International Journal of Remote Sensing*, 33(2), 466-489.
- Lu, Z., Patrick, M., Fielding, E. J., & Trautwein, C. (2003). Lava volume from the 1997 eruption of Okmok volcano, Alaska, estimated from spaceborne and airborne interferometric synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 41(6), 1428-1436.
- Luo, Q., Perissin, D., Lin, H., Zhang, Y., & Wang, W. (2014). Subsidence monitoring of Tianjin suburbs by TerraSAR-X persistent scatterers interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5), 1642-1650.
- Luo, X., Wang, C., Long, Y., & Yi, Z. (2020). Analysis of the decadal kinematic characteristics of the Daguangbao Landslide using multiplatform time series InSAR observations after the Wenchuan Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12).
- Mantovani, F., Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15(3-4), 213-225.
- Martins, B. H., Suzuki, M., Yastika, P. E., & Shimizu, N. (2020). Ground surface deformation detection in complex landslide area—bobonaro, Timor-Leste—using SBAS DInSAR, UAV photogrammetry, and field observations. *Geosciences*, 10(6), 245.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500.
- Mehrabi, A. (2021). Monitoring the Iran Pol-e-Dokhtar flood extent and detecting its induced ground displacement using Sentinel-1 imagery techniques. *Natural Hazards*, 105(3), 2603-2617.
- Meisina, C., Zucca, F., Notti, D., Colombo, A., Cucchi, A., Savio, G., Giannico, C., & Bianchi, M. (2008). Geological interpretation of PSInSAR data at regional scale. *Sensors*, 8(11), 7469-7492.
- Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 284-303.
- Mirzaee, S., Motagh, M., Akbari, B., Wetzell, H. U., & Roessner, S. (2017). Evaluating three InSAR time-series methods to assess creep motion, case study: Masouleh landslide in north Iran. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(1/W1), 223-228.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6-43.
- Noor, S., Mahmood, S., & Habib, W. (2024). Risk assessment of Attabad Lake outburst flooding using an integrated hydrological and geo-spatial approach. *Advanced Geomatics*, 4(1), 57-67.
- Novellino, A., Cigna, F., Sowter, A., Ramondini, M., & Calcaterra, D. (2017). Exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) algorithm with COSMO-SkyMed data for landslide inventory mapping in north-western Sicily, Italy. *Geomorphology*, 280, 153-166.
- Nurtyawan, R., & Yulanda, M. F. (2020). Lombok earthquakes using DInSAR techniques based on

- Sentinel 1A data (case study: Lombok, West Nusa Tenggara). In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (500)1, 012065.
- Pastor, J. L., Tomás, R., Lettieri, L., Riquelme, A., Cano, M., Infante, D., Ramondini, M., & Di Martire, D. (2019). Multi-source data integration to investigate a deep-seated landslide affecting a bridge. *Remote Sensing*, 11(16), 1878.
- Paul, B. K. (2011). *Environmental hazards and disasters: Contexts, perspectives, and management*. John Wiley & Sons.
- Pawluszek-Filipiak, K., Borkowski, A., & Motagh, M. (2021). Multi-temporal landslide activity investigation by spaceborne SAR interferometry: The case study of the Polish Carpathians. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100629.
- Pulvirenti, L., Chini, M., & Pierdicca, N. (2021). InSAR multitemporal data over persistent scatterers to detect floodwater in urban areas: A case study in Beletweyne, Somalia. *Remote Sensing*, 13(1), 37.
- Putri, R. F., Wibirama, S., Alimuddin, I., Kuze, H., & Sumantyo, J. T. S. (2013). Monitoring and analysis of landslide hazard using dinsar technique applied to ALOS PALSAR imagery: A case study in Kayangan catchment area, Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(2), 308-323.
- Razi, P., Sumantyo, J. T. S., Perissin, D., Kuze, H., Chua, M. Y., & Panggabean, G. F. (2018). 3D land mapping and land deformation monitoring using persistent scatterer interferometry (PSI) ALOS PALSAR: Validated by geodetic GPS and UAV. *IEEE Access*, 6, 12395-12404.
- Rehdanz, K., Welsch, H., Narita, D., & Okubo, T. (2015). Well-being effects of a major natural disaster: The case of Fukushima. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 116, 500-517.
- Reigber, A., & Moreira, A. (2000). First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2142-2152.
- Roa, Y., Rosell, P., Solarte, A., Euillades, L., Carballo, F., García, S., & Euillades, P. (2021). First assessment of the interferometric capabilities of SAOCOM-1A: New results over the Domuyo Volcano, Neuquén, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 102882.
- Rosi, A., Tofani, V., Agostini, A., Tanteri, L., Stefanelli, C. T., Catani, F., & Casagli, N. (2016). Subsidence mapping at regional scale using persistent scatterers interferometry (PSI): The case of Tuscany region (Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 328-337.
- Rosi, A., Tofani, V., Tanteri, L., Tacconi Stefanelli, C., Agostini, A., Catani, F., & Casagli, N. (2018). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution. *Landslides*, 15(1), 5-19.
- Salvi, S., Atzori, S., Tolomei, C., Antonioli, A., Trasatti, E., Merryman Boncori, J. P., Pezzo, G., Coletta, A., & Zoffoli, S. (2012). Results from InSAR monitoring of the 2010-2011 New Zealand seismic sequence: EA detection and earthquake triggering. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 22-27 July 2012, Munich, Germany, 3544-3547.
- Sandwell, D. T., Myer, D., Mellors, R., Shimada, M., Brooks, B., & Foster, J. (2008). Accuracy and resolution of ALOS interferometry: Vector deformation maps of the Father's Day intrusion at Kilauea. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11), 3524-3534.
- Sanyal, J., & Lu, X. X. (2004). Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: a review. *Natural Hazards*, 33(2), 283-301.
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., & Papini, M. (2014). Remote sensing for landslide investigations: An overview of recent achievements and perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), 9600-9652.
- Schilling, S. P. (1998). LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. *US Geological Survey Open-File Report 98-638*, 79.
- Schwab, A. K., Sandler, D., & Brower, D. J. (2016). *Hazard mitigation and preparedness: An introductory text for emergency management and planning professionals*. CRC Press, 2nd edn.
- Schweier, C., Markus, M., & Steinle, E. (2004). Simulation of earthquake caused building damages for the development of fast reconnaissance techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2), 285-293.
- Sefercik, U. G., & Dana, I. (2012). Crucial points of interferometric processing for DEM generation using high resolution SAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 289-296.
- Sefercik, U. G., Buyuksalih, G., & Atalay, C. (2020). DSM generation with bistatic TanDEM-X InSAR pairs and quality validation in inclined topographies and various land cover classes. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-15.
- Sefercik, U. G., Nazar, M., & Gorken, M. (2024). Coherence analysis of small baseline subset displacement model types in deformation monitoring. *45th Asian Conference on Remote Sensing*, 17-21 November 2024, Colombo, Sri Lanka, 1-14.
- SESWG (Solid Earth Science Working Group) Report, (2002). *Living on a Restless Planet*. S. C. Solomon, Chair, NASA Jet Propulsion Laboratory, Report JPL 400-1040, November.
- Shirani, K., & Pasandi, M. (2021). Landslide monitoring and the inventory map validation by ensemble DInSAR processing of ASAR and PALSAR images (Case study: Doab-Samsami Basin in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 1201-1222.
- Silvia, B., Francesca, C., Sandro, M., & Nicola, C. (2013). Monitoring landslide-induced displacements with TerraSAR-X persistent scatterer interferometry (PSI): Gimigliano case study in Calabria region (Italy). *International Journal of Geosciences*, 4(10), 1467-1482.
- Sowter, A., Bateson, L., Strange, P., Ambrose, K., & Syafiudin, M. F. (2013). DInSAR estimation of land

- motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields. *Remote Sensing Letters*, 4(10), 979-987.
- Sreejith, K. M., Agrawal, R., Agram, P., & Rajawat, A. S. (2020). Surface deformation of the Barren Island volcano, Andaman Sea (2007–2017) constrained by InSAR measurements: Evidence for shallow magma reservoir and lava field subsidence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 407, 107107.
- Stevens, N. F., Manville, V., & Heron, D. W. (2003). The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119(1-4), 89-105.
- Stramondo, S., Chini, M., Bignami, C., Salvi, S., & Atzori, S. (2010). X-, C-, and L-band DInSAR investigation of the April 6, 2009, Abruzzi earthquake. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1), 49-53.
- Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., & Spreckels, V. (2001). Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11), 1261-1270.
- Suresh, D., & Yarrakula, K. (2020). InSAR based deformation mapping of earthquake using Sentinel 1A imagery. *Geocarto International*, 35(5), 559-568.
- Syahreza, S., Saepuloh, A., & Lateh, H. (2018). Combining the Sentinel-1A/B DinSAR Interferometry to Detect Deformation Associated with Pidie Jaya Earthquake. *Journal of Physics: Conference Series*, 1120(1), 012021.
- Tang, W., Motagh, M., & Zhan, W. (2020). Monitoring active open-pit mine stability in the Rhenish coalfields of Germany using a coherence-based SBAS method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93, 102217.
- Tessari, G., Puliero, S., Beccaro, L., Giardino, A., Floris, M., Marzoli, A., Ogushi, F., & Pasquali, P. (2019). Multi-temporal DInSAR techniques to monitor the activity of Aso And Sakurajima Volcanoes, Japan. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 28 July-02 August 2019, Yokohama, Japan, 9338-9341.
- Tiwari, A., Narayan, A. B., Dwivedi, R., Dikshit, O., & Nagarajan, B. (2020). Monitoring of landslide activity at the Sirobagarh landslide, Uttarakhand, India, using LiDAR, SAR interferometry and geodetic surveys. *Geocarto International*, 35(5), 535-558.
- Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Persistent Scatterer Interferometry (PSI) technique for landslide characterization and monitoring. *Remote Sensing*, 5(3), 1045-1065.
- Tomás, R., Romero, R., Mulas, J., Marturià, J. J., Mallorquí, J. J., López-Sánchez, J. M., Herrera, G., Gutiérrez, F., González, P. J., Fernández, J., Duque, S., Concha-Dimas, A., Cocksley, G., Castañeda, C., Carrasco, D., & Blanco, P. (2014). Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: a review of practical issues through cases in Spain. *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 163-181.
- Toya, H., & Skidmore, M. (2007). Economic development and the impacts of natural disasters. *Economics Letters*, 94(1), 20-25.
- Tralli, D. M., Blom, R. G., Zlotnicki, V., Donnellan, A., & Evans, D. L. (2005). Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(4), 185-198.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1981). *Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 1-microwave remote sensing fundamentals and radiometry.*
- UNDRR, (1991). *Mitigating natural disasters: Phenomena, effects and options: A manual for policy makers and planners.* United Nations, New York.
- UNISDR, (2009). *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*, United Nations Office on Disaster Risk Reduction, Geneva.
- Usai, S. (2003). A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 753-760.
- USGS, (2004). *Landslide types and processes.* U.S. Geological Survey Fact Sheet 2004-3072.
- Valerio, E., Manzo, M., Casu, F., Convertito, V., De Luca, C., Manunta, M., Monterroso, F., Lanari, R., & De Novellis, V. (2020). Seismogenic source model of the 2019, M_w 5.9, East-Azerbaijan earthquake (NW Iran) through the inversion of Sentinel-1 DInSAR measurements. *Remote Sensing*, 12(8), 1346.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movement types and processes.* Special Report, 176, 11-33.
- Wang, Y., Colby, J. D., & Mulcahy, K. A. (2002). An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3681-3696.
- Wang, Z., Balz, T., Zhang, L., Perissin, D., & Liao, M. (2018). Using TSX/TDX pursuit monostatic SAR stacks for PS-InSAR analysis in urban areas. *Remote Sensing*, 11(1), 26.
- Wangchuk, S., Bolch, T., & Robson, B. A. (2022). Monitoring glacial lake outburst flood susceptibility using Sentinel-1 SAR data, Google Earth Engine, and persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112910.
- Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology*, 174, 103-138.
- Xichao, H., Meng, W., Bing, H., Tianbin, Y., & Yu, J. (2020). Study on early identification of landslide hazard in mountain valley area based on InSAR and optical remote sensing technology. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 570(6), 062047.
- Xu, B., Feng, G., Li, Z., Wang, Q., Wang, C., & Xie, R. (2016). Coastal subsidence monitoring associated with land reclamation using the point target based SBAS-InSAR method: A case study of Shenzhen, China. *Remote Sensing*, 8(8), 652.
- Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C., & Li, Q. F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental Geology*, 48(6), 713-720.

- Yakar, M., & Dogan, Y. (2019). 3D Reconstruction of Residential Areas with SfM Photogrammetry. In *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), Tunisia 2018* (pp. 73-75). Springer International Publishing.
- Yalçın, C. (2022). DEM and GIS-based assessment of structural elements in the collision zone: Çağlayancerit, Kahramanmaraş (Türkiye). *Advanced Remote Sensing*, 2(2), 66-73.
- Yang, C. S., Zhang, Q., Zhao, C. Y., Wang, Q. L., & Ji, L. Y. (2014). Monitoring land subsidence and fault deformation using the small baseline subset InSAR technique: a case study in the Datong Basin, China. *Journal of Geodynamics*, 75, 34-40.
- Yılmaz, O. S. (2023). Frekans oranı yöntemiyle coğrafi bilgi sistemi ortamında heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi: Manisa, Demirci, Tekeler Köyü örneği. *Geomatik*, 8(1), 42-54.
- Yun, H. W., Kim, J. R., Yoon, H., Choi, Y., & Yu, J. (2019). Seismic Surface Deformation Risks in Industrial Hubs: A Case Study from Ulsan, Korea, Using DInSAR Time Series Analysis. *Remote Sensing*, 11(10), 1199.
- Zaugg, D. A., Arnold, D. V., & Jensen, M. A. (2000). Ocean surface and landslide probing with a scanning radar altimeter. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 24-28 July 2000, Honolulu, HI, USA, 1, 120-122.
- Zhang, Y., Liu, Y., Jin, M., Jing, Y., Liu, Y., Liu, Y., Sun, W., Wei, J., & Chen, Y. (2019). Monitoring land subsidence in Wuhan City (China) using the SBAS-InSAR method with Radarsat-2 imagery data. *Sensors*, 19(3), 743.
- Zhao, C. Y., Zhang, Q., Ding, X. L., Lu, Z., Yang, C. S., & Qi, X. M. (2009). Monitoring of land subsidence and ground fissures in Xian, China 2005–2006: Mapped by SAR interferometry. *Environmental Geology*, 58(7), 1533-1540.
- Zhao, C. Y., Zhang, Q., Yang, C., & Zou, W. (2011). Integration of MODIS data and Short Baseline Subset (SBAS) technique for land subsidence monitoring in Datong, China. *Journal of Geodynamics*, 52(1), 16–23.
- Zhou, L., Guo, J., Hu, J., Li, J., Xu, Y., Pan, Y., & Shi, M. (2017). Wuhan surface subsidence analysis in 2015–2016 based on Sentinel-1A data by SBAS-InSAR. *Remote Sensing*, 9(10), 982.
- Zhu, X. X., & Bamler, R. (2010). Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(12), 4296-4308.



© Author(s) 2025. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>