Havalimanlarında Yapısal Değişimlerin PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi: İstanbul Havalimanı Örneği

(Detection of Structural Movements with PSInSAR Technique at Airports: A Case Study of Istanbul Airport)

Nur YAĞMUR^{*1,2}, Nebiye MUSAOĞLU¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye ²Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye yagmurn@itu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 09.05.2022

Kabul Tarihi (Accepted): 27.07.2022

ÖΖ

Deniz dolgusuna veya ıslah edilen arazilere inşa edilen havalimanları, gerek yapının ağırlığıyla zeminde oturması ve gerekse de dolgu kili kullanıldığında kilin zamanla şişmesi-kabarması sonucu vapivi kaldırmasına karşı oldukça hassas konumdadır. Ayrıca, dolgularda zemin sıvılaşması tektonik hareketlere karşı yapıyı daha da hassas bir hale getirmektedir. Zaman içerisinde zeminde ve yapılarda meydana gelen geliştirilen hareketlerin belirlenmesi amacıyla Interferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR-Interferometric Synthetic Aperture Radar) zaman serisi yöntemleri, kullanılan uydu görüntülerinin mekânsal çözünürlüğüne bağlı olarak mm mertebesinde meydana belirleyebilmektedir. gelen deformasyonları Bu çalışmada, sulak alanlar üzerine inşa edilen İstanbul Havalimanı'nın kullanıma açıldığı Kasım 2018'den Kasım 2021 yılına kadar meydana gelen yapısal hareketler Sabit Saçıcı Interferometri (PSI-Persistent Scatterer Interferometry) vöntemi kullanılarak belirlenmistir. Çalışmada, Avrupa Uzay Ajansı tarafından ücretsiz olarak servis edilen ve yükselen yörüngede alınan 186 Sentinel-1 SAR görüntüsü kullanılmıştır. Ayrıca sonradan inşa edilen C pisti için gerçekleştirilen analizde de Temmuz 2020-Kasım 2021 zaman aralığında 85 uydu görüntüsü kullanılmıştır. Elde sonuçlara havalimanının edilen göre kuzev kesimlerinde uydu bakış yönünde negatif yönde yüzey hareketi tespit edilirken, güney kesimlerinde ise pozitif yönde yüzey hareketi tespit edilmiştir. 73 ha sulak alanın ıslah edildiği bölgenin çevresinde -20 mm'ye yüzey hareketlerinin belirlenmesi. varan havalimanlarında ıslah edilerek doldurulan alanların zemin hareketlerine karşı daha hassas olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, özellikle dolgu alanlar üzerine inşa edilen yapılarda ve özellikle havalimanlarında hem yersel hem de uydu bazlı sürekli izleme sistemlerinin kurulması için yol gösterici olarak kullanılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan Algılama, InSAR, Havalimanı, PSI, İstanbul Havalimanı

ABSTRACT

Airports built on sea fill or reclaimed land are quite sensitive to the fact that the settlements occur due to the weight of the structure, and when the clay is used as filling material, the clay swells over time and lifts the structure. In addition, soil liquefaction in filled lands makes the structure even more sensitive to tectonic movements. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) time series methods, developed for determining the movements that occur over time, can determine the mm scale deformations depending on the spatial resolution of the satellite image used. For this purpose, the deformation analysis of Istanbul Airport, which was built on reclaimed wetlands area, between the years November 2018 that airport was put into operation and November 2021 using the Persistent Scatterer Interferometry (PSI) method. In the study, 186 Sentinel-1 SAR images in ascending orbit direction provided free of charge by the European Space Agency were used. In addition, 85 satellite images were used in the analysis carried out between July 2020 and November 2021 for the runway C which was put into operation in July 2020. According to the obtained results, settlement movement was detected in the satellite line of sight (LOS) direction in the northern parts of the airport, while the uplift movement was detected in the southern parts. Determination of up to 20 mm settlement movements around the area where 73 ha of wetland was reclaimed shows that the reclaimed areas were more sensitive to the movements in the airport. The obtained results can be used as a guide for the establishment of both terrestrial and satellite-based continuous monitoring systems, especially in airports built on filled areas.

Keywords: Remote Sensing, InSAR, Airport, PSI, Istanbul Airport

1. GiRiş

Büyük şehirlerde nüfusun artmasıyla ulaşım altyapılarında yeni ihtiyaçlar doğmuştur. Zaman içerisinde şehirleşme kırsal alanlara doğru ilerlemiş, hatta artan ihtiyacı karşılamak için deniz dolgusu veya inşaata elverişli olmayan alanların ıslahına doğru yönelim başlamıştır (Zhuo ve diğerleri, 2019). Son yıllarda, havalimanları da birçok farklı ülkede şehir merkezine uzak ve dolgu alanlar üzerine inşa edilmektedir (Liu ve diğerleri, 2019; Wu ve diğerleri, 2020; Bayik ve Abdikan, 2021).

Arazi ıslahı veya deniz dolgusu genellikle dolgu malzemelerinin konsolide olmayan deniz çökelleri üzerine boşaltılması olarak ifade edildiğinden (Yang ve diğerleri, 2018), bu şekilde kazanılan alanlar üzerine inşa edilen liman, otoyol,

Atıf/To cite this article: Yağmur, N. ve Musaoğlu, N. (2022). Havalimanlarında Yapısal Değişimlerin PSInSAR Tekniği ile Belirlenmesi: İstanbul Havalimanı Örneği. Harita Dergisi, *168*, 28-37.

havalimanı pistleri ve yeraltı tesisleri gibi ulaşım yapılarında hasarlar oluşabilmektedir (Liu ve diğerleri, 2019). Özellikle dolgu alanlar üzerine inşa edilmiş pistler üzerinde meydana gelebilecek yapısal hasarlar can ve mal kaybının yanı sıra ciddi ekonomik kayıplara da sebep olabilir.

Yapı hasarları birçok geleneksel yöntemle tespit ve takip edilebilmektedir. Ancak Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS-Global Navigation Satellite Systems), nivelman, inklonometre vb. ölçme yöntemleri yüksek doğruluğa sahip olsa da nokta tabanlı olup büyük altyapı tesislerinin zemin hareketlerinin belirlenmesinde yüksek iş gücü ve maliyet gerektirmektedir (Wang ve diğerleri, 2011; Baek ve diğerleri, 2019). Bu noktada, İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR-Interferometric Synthetic Aperture Radar) düşük maliyet, kötü hava koşullarında dahi algılama kapasitesi, yüksek mekânsal çözünürlük ve geniş kapsama bakımından zemin alanı ve vapi deformasyonlarının belirlenmesinde sıklıkla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Hu ve diğerleri, 2014). İnterferometri teknikleri sadece arazi yüzeyinde meydana gelen deformasyonların belirlenmesinde değil (Talib ve diğerleri, 2022), köprü (Xiong ve diğerleri, 2021), demiryolu (Zhang ve diğerleri, 2019), karayolu (Macchiarulo ve diğerleri, 2022) ve havalimanı (Bianchini Ciampoli ve diğerleri, 2020) gibi birçok ulaşım altyapısında meydana gelen konumsal değişimin tespitinde de sıkça kullanılmaktadır. Günümüzde ücretsiz SAR uvdu verilerine erişimin kolaylaşması da uygulamaların yaygınlaşmasında en büyük etkenlerden biridir.

Konumsal değişimin belirlenmesinde kullanılan InSAR tekniği, farklı zamanlarda aynı bölgeyi kapsayan iki SAR görüntüsünü kullanır ve uydu bakış doğrultusu (UBD) boyunca yüzey yer değiştirmesini elde etmek için iki zaman periyodu arasındaki faz farkını ölçer (Gabriel ve diğerleri, 1989). Değişimin sürekli olarak izlenebilmesi için ise InSAR zaman serisi vöntemleri gelistirilmistir. (PSI-Persistent Sabit Sacici Interferometri Scatterer Interferometry) ve Kısa Baz Uzunluğu Interferometri (SBAS-Small BAseline Subset) en çok kullanılan zaman serisi yöntemleridir. PSI, yapay yüzeylerin deformasyonlarının belirlenmesinde santimetrenin altında doğrulukta başarılı sonuçlar verirken (Van der Horst ve diğerleri, 2018; Erten ve Rossi, 2019), SBAS yönteminin ise arazi yüzeyi değişimlerinin belirlenmesinde kullanımı daha uygundur (Chen ve diğerleri, 2018). Bu yüzden, çalışma kapsamında PSI yöntemi kullanılmıştır.

PSI yöntemi kullanılarak havalimanlarında konumsal değişimlerin belirlenmesi üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bianchini Ciampoli ve diğerleri (2020), İtalya'da bulunan Leonardo Da Vinci Uluslararası Havalimanı'nda meydana gelen değişimleri belirlemek için havalimanının 3. pisti üzerinde yapılan nivelman ve LiDAR ölçmelerinin yanı sıra COSMO-SkyMed uydu verilerine PSI yöntemini uygulamıştır. Elde edilen sonuclar neticesinde PSI tekniğinin deformasyon analizinde oldukça doğru ve güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çin'de bulunan ve deniz dolgusu üzerine inşa edilmiş Shanghai Pudong Uluslararası Havalimanı için gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise Sentinel-1 uydu görüntülerine PSI yöntemi uygulanmış ve elde edilen sonuçların nivelman ölçmeleri ile tutarlı olduğu belirtilmiştir (Bao ve diğerleri, 2022). Sentinel-1 uydu verilerinin ücretsiz olarak erişime açılması ve orta mekânsal çözünürlüğe sahip C bandının havalimanı gibi yapı türlerindeki konumsal değişiminin tespitinde uygulanabilirliği birçok çalışmayla ortaya konmuştur (Marshall ve diğerleri, 2018; Hu ve diğerleri, 2019; Gagliardi ve diğerleri, 2021).

Yağmur ve diğerleri (2022) tarafından İstanbul Havalimanı'nda meydana gelen konumsal değişim PSI ve SBAS yöntemleriyle Kasım 2018-Mart 2021 zaman aralığı için tespit edilmişti. Bu calışma kapsamında ise dolgu alanlar üzerine inşa edilen ve İstanbul'un 3. havalimanı olan İstanbul Havalimanı'nın Kasım 2018-Kasım 2021 zaman aralığında 3 yıllık konumsal değişim analizinin yanı sıra inşaatı sonradan tamamlanan C pisti için de ayrıca interferometrik analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilip zaman serisi olarak da incelenerek zemin yapısıyla ilişkisi kurulmuştur. Yüzey hareketleri, ücretsiz olarak temin edilen Sentinel-1 PSI yönteminin uydu görüntülerine uygulanmasıyla mm ölçeğinde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar inşaat öncesi ıslah edilen sulak alanların konumuyla ilişkilendirilerek verilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI

İstanbul Havalimanı, İstanbul'un Avrupa Yakası'nda, Karadeniz'e kıyısı olan Tayakadın ile Akpınar köyleri arasındaki 76,5 km² alan üzerine inşa edilmektedir (Şekil-1). 2014 yılında başlayan zemin etütlerinin tamamlanmasının ardından Mayıs 2015'te başlanan havalimanı inşaatı 4 fazdan oluşmaktadır. Şu an birinci faz evresinde olan havalimanının 2029 yılında tamamlanması planlanmaktadır ("IGA", t.y.). 6 adet pistten oluşan İstanbul Havalimanı, iki pisti tamamlandıktan sonra 29 Ekim 2018'de kullanıma açılmıştır.



Şekil 1. İstanbul Havalimanı'nın Türkiye haritası üzerinde konumu ve Google Earth görüntüsü

İstanbul Havalimanı'nın inşa edildiği bölge, 1970-1990 yılları arasında şehrin kömür ihtiyacını karşılamak amacıyla açık kömür ocağı olarak kullanılmaktaydı. Başlangıçta orman alanlarından çıkarılırken, yer üstü kaynaklarının kömür tükenmesiyle kömür sahalarından çıkarılan kazı materyalleri kullanılarak deniz dolduruldu ve kömür ocakları için yeni alanlar açıldı. 1990'lardan sonra doğalgazın şehre gelmesi yeni bir alternatif oluşturdu ve kömür kullanımının azalmasıyla açık kömür ve kum ocakları terkedildi (Seker ve diğerleri, 2008). Terkedilen maden ocakları zamanla yeraltı suyu ve yağmur suyuyla dolarak sulak alanları oluştururken, kum artıklarıyla oluşan yığınlar da ağaçlandırılmıştır (JMO, 2014). Kömür ve kum ocakları kazılırken çıkarılan kazı malzemeleri ise gelişigüzel yerleştirilerek hem sulak alanların oluşmasına sebep olmuş hem de bölgenin ekolojik sistemini bozmuştur (Cingöz, 2017). Oluşan sulak alanlar ise zamanla kendi ekosistemini oluşturmuştur. Ancak havalimanı insaatına başlanmasıyla sulak alanların ekosistemi tahrip edilmiş ve ıslah edilerek doldurulmuştur. Ayrıca bölgedeki zemin yapısı "zavıf zemin" olarak nitelendirilmekte ve mühendislik uygulamalarına uygun olmadığı da ifade edilmektedir (Cingöz, 2017). Şekil 2'de Landsat 8 uydu görüntüleriyle havalimanı inşaatı öncesi ve sonrası gösterilmiştir. Şekil 2a'da yer alan irili ufaklı birçok sulak alanın, havalimanı inşaatı sonrası yok olduğu Şekil 2b'de görülmektedir.

Çalışma alanının arazi örtüsü/arazi kullanımı (AÖ/AK) haritaları ise Şekil 2c ve 2d'de verilmiştir. AÖ/AK haritaları, Avrupa Çevre Ajansı tarafından yürütülen Çevresel Bilginin Koordinasyonu (CORINE-Coordination of Information on the Environment) programı ile 1:100 000 ölçekli olarak hazırlanmakta ve ücretsiz olarak sunulmaktadır ("CORINE", t.y.). Çalışma alanını da kapsayan 2012 ve 2018 yıllarına ait AÖ/AK haritaları incelendiğinde, havalimanı inşaatı öncesinde bölgede, orman ve eski maden ocaklarının su ile dolmasıyla oluşan su kütlelerinin hâkim olduğu görülmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

Sentinel-1 uydu görüntüleri, hem orta çözünürlükteki SAR uydu görüntülerinin bölgesel çalışmalarda yeterli potansiyele sahip olması hem de ücretsiz ulaşılabilmesinden dolayı güncel literatürde sıkça tercih edilmektedir. Çalışmada havalimanının kullanıma açıldığı Kasım 2018-Kasım 2021 zaman aralığında algılanmış 186 adet Sentinel-1 SAR uydu görüntüsü kullanılmıştır. Avrica uygulamanın gerceklestirildiği süre zarfında inşaat halinde olan C pisti için de zaman serisi aralığı C pistinin kullanıma açıldığı tarihe (Temmuz 2020-Kasım 2021) çekilerek 85 görüntü ile tekrarlanmıştır.

Sentinel-1 SAR uydu görüntüleri, Avrupa Uzay Ajansı (ESA-European Space Agency) tarafından ücretsiz olarak servis edilmektedir. Orta mekânsal çözünürlükteki C bandına sahip Sentinel-1 uydu verisinin kullanılmasıyla mm mertebesinde doğruluk sağlanmaktadır (Ma ve diğerleri, 2019). 12 gün olan zamansal çözünürlüğü, Avrupa üzerinde 6 güne yükselmektedir. İstanbul Havalimanı da bu bölgeye dahil olduğundan, kullanılan veri setinin zamansal sıklığı 6 gündür.



Şekil 2. Çalışma alanının a) havalimanı inşa edilmeden önce (2014) ve b) inşa edildikten sonrasına (2021) ait Landsat 8 (Yakın Kızılötesi-Kırmızı-Yeşil) uydu görüntüleri ile CORINE programı ile elde edilen 2012 (c) ve 2018 (d) yıllarına ait AÖ/AK haritası

Hem yükselen hem de alçalan yörüngede veri temin edebilen Sentinel-1 uydusunun, yükselen yörüngede elde edilen görüntüleri ile zaman serisi InSAR analizi gerçekleştirilmiştir. Düz yüzeylerde yükselen ve alçalan yörüngede benzer sonuçlar elde edildiğinden (Aslan ve diğerleri, 2019; Bilgilioğlu ve diğerleri, 2021) çalışma alanının topografik yapısı göz önünde bulundurularak sadece yükselen yörüngede elde edilen görüntüler kullanılmıştır.

Kullanılan uydu verilerinin teknik özellikleri ve zaman aralıkları Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan görüntüler tek bakışlı karmaşık (SLC-Single Look Complex) formatında elde edilmiş ve düşey-düşey (VV- Vertical-Vertical) polarizasyonda çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Sentinel-1 uydu verisinin teknik
özellikleri ve detayları ("ESA", t.y.)

		,	
Algılayıcı	Sentinel-1		
Dalga Boyu	C bandı		
Modu	IW (Interferometric Wide)		
Mekansal	5×20		
Çözünürlük	(azimut×menzil)		
Polarizasyon	VV		
Yörünge	54		
Geçiş yörüngesi	Yükselen		
	Tümü	C pisti	
Periyot	Kasım 2018	Temmuz 2020	
	Kasım 2021	Kasım 2021	
Ana görüntü	16.05.2020	18.03.2021	
Görüntü sayısı	186	85	

Çalışma kapsamında PSI zaman serisi InSAR yöntemi kullanılmıştır. Ferretti ve diğerleri (2000) tarafından geliştirilen PSI yönteminde, sabit saçıcılar (PS-Persistent Scatterer) olarak anılan faz kararlı noktasal hedefler, elektromanyetik geri saçılımlarının genlikleri üzerinde istatistiksel bir analiz temelinde tespit edilebilmektedir. N + 1 adet SAR görüntüsünden, ortak ana (öncül) görüntüye göre N adet interferogram üretilmektedir. Sabit sacıcılar dekorelasvondan etkilenmediğinden. normal ve zamansal baz uzaklığına bakılmaksızın tüm interferogramlar PSI işlemine dahil edilebilir (Colesanti ve diğerleri, 2003). Kullanılan Sentinel-1 uydu görüntülerinin zamansal ve dik baz uzunlukları Şekil 3'te gösterilmektedir. Öncül kırmızı gösterilmiştir. görüntü ise renkle İnterferogramlar öncül görüntü baz alınarak üretilmiştir.



Şekil 3. a) Kasım 2018-Kasım 2021 186 SAR görüntüsü, b) Temmuz 2020-Kasım 2021 85 SAR görüntüsü ile gerçekleştirilen PSI zaman serisi dik ve zamansal baz uzaklığı

Interferogramlar üretilmeden önce 3 interferometrik geniş alan modunda alınan şerit (sub-swath) ve 9 parcadan (burst) olusan SLC görüntüler, çalışma bölgesini kapsayan şeritteki parçalar ilaili secilerek bölünür. Yörünge düzeltmelerinin ve mekânsal düzeltmelerin

yapılmasıyla görüntüler, interferometrik analize hazır hale getirilir. İnterferogram üretimi, üretilen interferogramların birleştirilmesi ve topografik faz etkilerinin giderilmesiyle veriler PSI işlemine hazır hale getirilir. PS seçimi, SRTM (30×30 m) sayısal yükseklik modeli ile hata düzeltmesi ve faz çözümü (unwrapping) işlemleri de uygulanarak değişim haritası konumsal elde edilmistir (Osmanoğlu ve diğerleri, 2016). Atmosferik filtreleme aşamasında TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise) uygulama paketinden yararlanılarak kullanılan lineer model troposferik etkiler giderilmiştir. Çalışma ile sonucunda elde edilen PS noktalarına tutarlılık (coherence) değerlerine göre 0.60 eşik değeri uygulanarak filtrelenmiştir ve 3 yıllık süre zarfı için gerçekleştirilen analizde havalimanının inşa edildiği alan içerisinde 14907 PS noktası tespit edilmiştir. C pisti için ayrıca gerçekleştirilen konumsal değişim analizinde de aynı eşik değeri kullanılmış olup C pistinde de PS noktalarının tespit edilmesiyle beraber nokta sayısı 32057 olarak belirlenmiştir.

Çalışmada PSI yöntemi SNAP ve StaMPS yazılımları aracılığıyla uygulanmıştır. SNAP (Sentinel Application Platform), ESA tarafından uydu verilerinin işlenmesi için üretilen ücretsiz bir yazılımdır. Interferogramlar SNAP yazılımı ile üretilip, PSI analizi ise birçok farklı üniversitenin katkılarıyla geliştirilen StaMPS yazılımı aracılığıyla tamamlanmıştır. SNAP ve StaMPS aracılığıyla gerçekleştirilen PSI zaman serisi konumsal değişim analizinin işlem adımları Şekil 4'te verilmiştir.

Ayrıca, dolgu alanların tespit edilebilmesi ve zemin koşullarına etkilerinin araştırılması amacıyla havalimanı inşaatı öncesi elde edilmiş Landsat-8 uydu görüntüsü ile sulak alan sınırları tespit edilmiştir. Landsat, 40 yılı aşkın süredir ücretsiz olarak servis ettiği orta mekânsal çözünürlüğe sahip uydu verisi arşivi ile zamansal ve mekânsal analizlere olanak sağlamaktadır. Landat-8 uydu görüntülerinin teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4. PSI zaman serisi işlem adımları

Tablo 2. Kullanılan Landsat-8 uydu verisinin teknik özellikleri ve detayları ("USGS", t.y.)

Algılayıcı	Landsat-8
Spektral çöz. (µm)	11 bant (0.43-12.51)
Mekansal çöz.	B8: 15 m B1-7, 9: 30 m B10-11: 100 m
Radyometrik çöz.	16 bit
Zamansal çöz.	16 gün
Görüntü tarihi	01.07.2014

1 Temmuz 2014 tarihli Landsat-8 uydu görüntüsüne Normalize Edilmiş Fark Su Indisi (NDWI-Normalized Difference Water Index) uygulanmıştır ve sulak alanlar tespit edilmiştir. NDWI, uydu görüntülerinin yeşil ve yakın kızılötesi (NIR-Near Infrared) bantlarını kullanarak su alanlarını tespit eder ve elde edilen değerler -1 ve +1 değer aralığında değişmektedir (Eşitlik 1). Sıfırın üzerindeki pozitif değerlerin suyu temsil ettiği belirtilmektedir (Mcfeeters, 1996). Şekil 2a'da gösterilen 1 Temmuz 2014 tarihli uydu görüntüsü üzerinde bulut bulunmasına rağmen uydu görüntüsü arşivinde 2014 yılına ait en elverişli uydu görüntüsü olması sebebiyle yine de kullanılmıştır. Ancak bulut sebebiyle sınırları tespit edilemeyen birkaç sulak alan sınırı manuel olarak düzenlenmiştir.

$$NDWI = (Yeşil - NIR) / (Yeşil + NIR)$$
(1)

4. BULGULAR

Havalimanında meydana gelen zemin hareketlerinin tespit edilebilmesi amacıyla yükselen yörüngede alınan 186 Sentinel-1 uydu görüntüsüne PSI yöntemi uygulanmıştır ve sonuçlar UBD yönünde elde edilmiştir. İstanbul Havalimanı 29 Ekim 2018 tarihinde kullanıma açıldığından tarih aralığı Kasım 2018-Kasım 2021 olarak belirlenmiştir. Kullanıma açıldığında sadece A ve B pistleri hizmet veren havalimanına. Temmuz 2020'de C pisti de tamamlanarak dahil edilmiştir. Ancak PSI zaman serisi yönteminde, inşaat alanları sabit saçıcı noktaların kısmen veya tamamen kaybedilmesine sebep olduğundan (Crosetto ve diğerleri, 2016) ve zaman serisi analizinin kapsadığı zaman aralığında C pisti inşaat halinde olduğundan bu piste ait konumsal değişim bilgisi ayrıca elde edilmiştir. Elde edilen değişim haritaları Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5'te kırmızı renkle gösterilen PS noktaları UBD yönünde negatif yönde yüzey (oturma) hareketini gösterirken, mavi renkle gösterilen noktalar ise pozitif yönde yüzey hareketini ifade etmektedir. Sarı, turuncu ve yeşil renkle gösterilen noktalar ise stabil hareketleri ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre analizin gerçekleştirildiği 3 yıllık süre zarfında (Şekil 5a) UBD yönünde 20.7 mm/yıl konumsal değişim hızına varan oturmaların olduğu ve 13 mm/yıl konumsal değişim hızına varan pozitif yönde yüzey hareketinin olduğu tespit edilmiştir. Terminal binasının kuzeye bakan üst bölgesinde oturma eğiliminde bir hareket tespit edilirken, terminal binasının çatısında ve güneye bakan alt bölgesinde pozitif yönde kabarma eğiliminde bir hareket tespit edilmiştir.



Şekil 5. a) Kasım 2018-Kasım 2021 zaman aralığında 186 SAR görüntüsünden elde edilen PSI konumsal değişim hızı haritası, b) Temmuz 2020-Kasım 2021 zaman aralığında 85 SAR görüntüsünden elde edilen konumsal değişim hızı haritası

Şekil 5b'de verilen C pistindeki yüzey hareketlerinin tespiti için gerçekleştirilen çalışma sonucunda ise konumsal değişim hızı UBD yönünde -30 mm/yıl ve 21 mm/yıl aralığında değişmektedir. C pistinde oturma/negatif yönde hareketin olması ve bu hareketin özellikle dolgu malzemesi ile ıslah edilen sulak alanın olduğu bölgeyle kesişmesi de dolgu malzemesinin oturma eylemini gerçekleştirdiğinin bir göstergesidir. Analizin gerçekleştirildiği 1,5 yıllık süre zarfında pist üzerinde 10 mm'ye varan oturma hareketi tespit edilmiştir.

İstanbul Havalimanı'nda meydana gelen değişimlerin dolgu alanları ile ilişkisini incelemek amacıyla havalimanı inşaatına başlanmadan önce 2014 Temmuz ayında alınan Landsat-8 uydu görüntüsüne NDWI uygulanmış ve elde edilen sulak alan sınırları Şekil 5'te verilen konumsal değişim haritası üzerinde beyaz kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iki sulak alanın ıslah edilip doldurulmasıyla C pistinin inşa edildiği belirlenmiştir. Ayrıca B ve C pistinin arasında ve terminalin kuzeyinde yer alan bölgenin, önceden sulak alanı olduğu tespit edilmiştir. 73 ha alana sahip olan sulak alanın ıslah edildiği ve dolgu malzemeleriyle yok edildiği belirlenmiştir. Bu bölgeye yakın olan pistlerde negatif yönde yüzey hareketi tespit edilmiştir. Yağmur ve diğerleri (2022) tarafından Kasım 2018-Mart 2021 zaman aralığı için hem PSI hem de SBAS yöntemleri ile gerçekleştirilen yapısal değişim analizi sonuçlarında da hem belirtilen bölgede hem de çevresinde oturma eğilimi tespit edilmiştir. Kasım 2018-Kasım 2021 zaman aralığının ele alındığı bu çalışmada ise yüzey hareketinin sonraki 6 aylık periyotta yavaşladığı yüzey hareketlerine ilişkin zaman serileriyle tespit edilmiştir. Bu amaçla, Şekil 6'da siyah dairelerle gösterilen alanlar için yüzey hareketleri zaman serileri ile gösterilmiştir.

Zaman serisi grafikleri de yüzey hareketlerinin tipine ve rengine göre kırmızı-negatif ve mavipozitif konumsal değişim hızı seklinde renklendirilmiştir. Şekil 6a'da verilen ve A ve B pisti ile terminal binasının kuzey bölgesi için çizilen zaman serisinde negatif yönde yüzey hareketi pistlerde 30 mm'yi bulurken terminal binasının kuzey bölgesinde 20 mm'ye varmaktadır. Şekil 6b'de verilen ve B pistinin güney bölgesi ile terminal binasının çatısı için çizilen zaman serisinde pozitif yönde yüzey hareketi pistte 20 mm'ye ulaşırken, terminal binasının çatısında 10 mm'ye ulaşmaktadır.



Şekil 6. Kasım 2018-Kasım 2021 zaman aralığında elde edilen deformasyon haritasına göre siyah dairelerle gösterilen alanların negatif (a) ve pozitif (b) yönde yüzey hareketlerine ilişkin zaman serileri.

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, Sentinel-1 uydu görüntüleriyle dolgu alanlar üzerine inşa edildiği bilinen ve uydu görüntüleriyle de desteklenen İstanbul Havalimanı'nın yüzey hareketleri PSI zaman serisi yöntemiyle belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, terminal ve pistlerin kuzey uçlarında negatif yönde hareket olduğu tespit edilmiş ve bölgede inşaat öncesi var olan ve ıslah edilerek doldurulan 73 ha alana sahip sulak alanın bu hareketlere sebebiyet vermiş olabileceği belirtilmiştir. Havalimanının orta kesimlerinde stabil olan hareketler güney kesimlerine doğru pozitif verini yönde yüzey hareketlerine bırakmaktadır. Terminal binasının çatısı üzerinde ve alt kesimlerinde de benzer durum görülmektedir. Havalimanı genelinde negatif yönde yapı hareketleri 30 mm'ye ulaşırken, pozitif yönde ise 20 mm'ye varmaktadır. Zaman serisi sonuçlarından hareketle, zeminde ani oturmaların gerçekleştiği birincil oturma evresinin tamamlanarak yerini daha yavaş hareketlerle oturmaya ikincil sevreden bıraktığı söylenebilmektedir. İnşaatı sonradan tamamlanarak kullanıma açılan C pistinde de oturma hareketlerinin başladığı tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar havalimanlarının sürekli olarak izlenmesinde SAR uydu görüntülerinin ve InSAR zaman serisi yöntemlerinin önemini ve kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Yersel ölçmelerle noktasal olarak sonuçlar elde edilirken, SAR verilerini kullanarak PSI tekniği ile konumsal değişimin belirlenebilmesi sayesinde çalışma kapsamında da yaklaşık olarak 19 bin hektar alanın deformasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Yersel ölçmelerle bir arada kullanılabilmesinin yanı sıra PSI, doğruluğu kabul edilmiş bir yöntemdir. PSInSAR tekniği kullanılarak zemin ve yapı hareketlerinin tespit edilebildiği alanlar için önlemler alınabilir ve sürekli izleme istasyonları kurulabilir. Calışmada kullanıldığı gibi ücretsiz uydu verileri ve ticari olmayan açık kaynak kodlu yazılımlar ile düşük maliyette büyük altyapı sistemlerinin konumsal değişimi belirlenerek sürekli olarak izlenebilir ve meydana gelebilecek hasarların önüne geçilebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından desteklenen MDK-2021-43006 numaralı İTÜ Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)'ne finansal katkılarından dolayı teşekkür eder.

ORCID

Nur YAĞMUR 0000-0002-5915-6929	D	https://orcid.org/
Nebiye MUSAOĞLU 0000-0002-8022-8755	D	https://orcid.org/

KAYNAKLAR

- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C. ve Renard, F. (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*, *11*(*1*), 85. doi: 10.3390/rs11010085.
- Baek, W. K., Jung, H. S., Jo, M. J., Lee, W. J. ve Zhang, L. (2019). Ground subsidence observation of solid waste landfill park using multi-temporal radar interferometry. *International Journal of Urban Sciences*, 23(3), 406-421. doi: 10.1080/12265934.2018.1468275
- Bao, X., Zhang, R., Shama, A., Li, S., Xie, L., Lv, J., ... Liu, G. (2022). Ground deformation pattern analysis and evolution prediction of Shanghai Pudong International Airport based on PSI long time series observations. *Remote Sensing*, 14(3), 610. doi: 10.3390/rs14030610
- Bayik, C. ve Abdikan, S. (2021). Monitoring of small-scale deformation at sea-filled Ordu-Giresun Airport, Turkey from multi-temporal SAR data. *Engineering Failure Analysis*, *130*, 105738. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105738
- Bianchini Ciampoli, L., Gagliardi, V., Ferrante, C., Calvi, A., D'Amico, F. ve Tosti, F. (2020). Displacement monitoring in airport runways by persistent scatterers SAR interferometry. *Remote Sensing*, *12(21)*, 3564. doi: 10.3390/rs12213564
- Bilgilioğlu, B. B., Erten, E. ve Musaoğlu, N. (2021). Analysis of Salt Lake Volume dynamics using Sentinel-1 based SBAS measurements: A case study of Lake Tuz, Turkey. *Remote Sensing*, 13(14), 2701. doi: 10.3390/rs13142701
- Chen, H., Yang, T., Wang, Y. ve Yan, Y. (2018, Haziran). Assessing deformation of and impact of earthquakes on Jiuzhai-Huanglong Airport, China with InSAR techniques. In EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 1-4. VDE.

- Cingöz, H. (2017). İstanbul İli Yeniköy-Akpınar-Ağaçlı Yöresi Açık Ocak Maden Alanlarındaki Dolgu ve Dolgu Altı Materyallerin Jeoteknik Analizi ve Değerlendirmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, *68(1-2)*, 3-14. doi: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3
- CORINE (t.y.). CORINE Projesi. Erişim adresi: https://corine.tarimorman.gov.tr/corineportal/
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N. ve Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *115*, 78-89. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011
- Erten, E. ve Rossi, C. (2019). The worsening impacts of land reclamation assessed with Sentinel-1: The Rize (Turkey) test case. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 57-64. doi: 10.1016/j.jag.2018.08.007
- ESA (t.y.). Sentinel-1 Technical Document. Erişim adresi:https://sentinels.copernicus.eu/docume nts/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Specification.pdf/49c514c3-1574-4d94-aae2d8061a3baebd?t=1584020315000
- Ferretti, A., Prati, C. ve Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *38(5)*, 2202-2212. doi: 10.1109/36.868878
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. ve Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *94(B7)*, 9183-9191. doi: 10.1029/JB094iB07p09183
- Gagliardi, V., Bianchini Ciampoli, L., Trevisani, S., D'Amico, F., Alani, A. M., Benedetto, A. ve Tosti, F. (2021). Testing Sentinel-1 SAR interferometry data for airport runway monitoring: a geostatistical analysis. *Sensors*, *21(17)*, 5769. doi: 10.3390/s21175769

- Hu, J., Li, Z. W., Ding, X. L., Zhu, J. J., Zhang, L. ve Sun, Q. (2014). Resolving threedimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*, 133, 1-17. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.02.005
- Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., ... Lu, Y. (2019). Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101886. doi: 10.1016/j.jag.2019.05.019
- IGA (t.y.). Cumhuriyet tarihinin en büyük projesi: İstanbul Yeni Havalimanı. Erişim adresi: http://iga.phtools.net/insaat-asamalar.html
- JMO-Jeoloji Mühendisleri Odası (2014). Çevre Jeolojisi Açısından 3. Havaalanı. https://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/7c4e571 39a05e51_ek.pdf
- Liu, X., Zhao, C., Zhang, Q., Yang, C. ve Zhang, J. (2019). Characterizing and monitoring ground settlement of marine reclamation land of Xiamen New Airport, China with Sentinel-1 SAR Datasets. *Remote Sensing*, *11(5)*, 585. doi: 10.3390/rs11050585
- Ma, P., Li, T., Fang, C. ve Lin, H. (2019). A tentative test for measuring the sub-millimeter settlement and uplift of a high-speed railway bridge using COSMO-SkyMed images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 155, 1-12. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.06.013
- Macchiarulo, V., Milillo, P., Blenkinsopp, C. ve Giardina, G. (2022). Monitoring deformations of infrastructure networks: A fully automated GIS integration and analysis of InSAR timeseries. *Structural Health Monitoring*. doi: 10.1177/14759217211045912
- Marshall, C., Large, D. J., Athab, A., Evers, S. L., Sowter, A., Marsh, S. ve Sjögersten, S. (2018).
 Monitoring tropical peat related settlement using isbas insar, Kuala Lumpur International Airport (KLIA). *Engineering Geology*, 244, 57-65. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.07.015
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. doi: 10.1080/01431169608948714

- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. ve Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 90-102. doi:* 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003
- Seker, D. Z., Kaya, S., Alkan, R. M., Tanik, A. ve Saroglu, E. (2008). 3D coastal erosion analysis of Kilyos-Karaburun region using multitemporal satellite image data. *Fresenius Environmental Bulletin*, *17(11B)*, 1977-1982.
- Talib, O. C., Shimon, W., Sarah, K. ve Tonian, R. (2022). Detection of sinkhole activity in West-Central Florida using InSAR time series observations. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112793. doi: 10.1016/j.rse.2021.112793
- USGS, (t.y.). Landsat 8. Erişim adresi: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat -8/
- Van der Horst, T., Rutten, M. M., Van de Giesen, N. C. ve Hanssen, R. F. (2018). Monitoring land subsidence in Yangon, Myanmar using Sentinel-1 persistent scatterer interferometry and assessment of driving mechanisms. *Remote Sensing of Environment, 217*, 101-110. doi: 10.1016/j.rse.2018.08.004
- Wang, T., Perissin, D., Rocca, F. ve Liao M. S. (2011). Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. *Science China Earth Sciences*, *54*, 720–732. doi: 10.1007/s11430-010-4101-1
- Wu, S., Yang, Z., Ding, X., Zhang, B., Zhang, L. ve Lu, Z. (2020). Two decades of settlement of Hong Kong International Airport measured with multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111976. doi: 10.1016/j.rse.2020.111976
- Xiong, S., Wang, C., Qin, X., Zhang, B. ve Li, Q. (2021). Time-Series Analysis on Persistent Scatter-Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) Derived Displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao Bridge (HZMB) from Sentinel-1A Observations. *Remote Sensing*, 13(4), 546. doi: doi.org/10.3390/rs13040546
- Yagmur, N., Erten, E., Musaoglu, N. ve Safak, E. (2022). Assessing Spatio-temporal Dynamics of Large Airport's Surface Stability. *Geocarto International*, 1-13. doi: 10.1080/10106049.2022.2082554

- Yang, M. S., Yang, T. L., Zhang, L., Lin, J. X., Qin, X. Q. ve Liao, M. S. (2018). Spatial-Temporal Characterization of a Reclamation Settlement in the Shanghai Coastal Area with Time Series Analyses of X-, C-, and L-band SAR datasets. *Remote Sensing*, 10, 329. doi: 10.3390/rs10020329
- Zhang, Q., Li, Y., Zhang, J. ve Luo, Y. (2019). InSAR technique applied to the monitoring of the Qinghai–Tibet Railway. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *19*(*10*), 2229-2240. doi: 10.5194/nhess-19-2229-2019
- Zhuo, G., Dai, K., Shi, X., Li, S., Ran, P. ve Huang, H. (2019, Kasım). Monitoring Reclaimed Land Subsidence on Xiamen New Airport with Sentinel-1 Datasets. In 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). IEEE. doi: 10.1109/APSAR46974.2019.9048570