

Havalimanı Pistlerinde Deprem Etkisi ile Oluşan Hasarlar ve İyileştirme Yöntemleri

Bekir FİDAN* 

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 01.06.2025
Kabul Tarihi: 16.06.2025
Yayın Tarihi: 30.06.2025

Anahtar Kelimeler:

Deprem hasarları,
Sıvılaşma,
Havalimanı pistleri.

ÖZET

Havalimanı pistleri, kritik ulaşım altyapısının temel bileşenleri olup, deprem gibi doğal afetlere karşı yüksek dayanıklılık gerektiren yapılardır. Depremler, havalimanı pistleri gibi kritik ulaşım altyapılarında ciddi yapısal ve işlevsel hasarlara yol açabilmektedir. Bu çalışma, deprem etkisi altında havalimanı pistlerinde meydana gelen hasarların analizini ve mevcut iyileştirme yöntemlerinin değerlendirilmesini sunmaktadır. Depremler, havalimanı pistlerinde çeşitli hasar türlerine neden olmaktadır. Deprem etkisiyle ortaya çıkan başlıca hasarlar; zemin sıvılaşması, oturma (oturma farklılıkları), çatlak oluşumu (pist yüzeyinde çatlaklar), yüzey deformasyonları ve yapısal bozulmalar, drenaj sistemlerinde bozulmalar, altyapı stabilizasyonunda kayıplar şeklinde gözlemlenmektedir. Özellikle alüvyonal zeminlerde inşa edilmiş pistler, yüksek sıvılaşma riski nedeniyle deprem esnasında büyük zarar görebilmektedir. Bu tür hasarlar, pistlerin hizmet dışı kalmasına ve acil müdahale süreçlerinde önemli gecikmelere neden olabilmektedir. Özellikle yüksek magnitudü depremler sonrasında pistin operasyonel kapasitesinin ciddi şekilde etkilendiği gözlemlenmektedir. Deprem öncesi ve sonrası zemin açısından alınabilecek önlemler ve çeşitli güçlendirme-iyileştirme yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar dinamik kompaksiyon ve vibro kompaksiyon, çimento enjeksiyonu (Jet Grouting) ve kimyasal enjeksiyon (permeation grouting) olmak üzere enjeksiyon tabanlı yöntemler, kum kazıkları ve dikey drenajlar, jet kazıklar ve mini kazıklar, zemine kireç, çimento, uçucu kül gibi katkıları karıştırarak yapılan mekanik stabilizasyon, geosentetik donatılarla zeminin takviyesi, biyolojik stabilizasyon, şok dalgası ile sıkıştırma gibi yöntemler, statik basınçlı sıkıştırma (CPG), derin karıştırma (DSM) olarak sıralanabilir. İyileştirme yöntemleri açısından, mevcut yaklaşımlar hem proaktif hem de reaktif stratejiler içermektedir. Proaktif yöntemler arasında sismik tasarım kriterlerinin geliştirilmesi, zemin iyileştirme teknikleri ve esnek pist yapı sistemleri bulunmaktadır. Reaktif yöntemler ise hızlı hasar değerlendirme protokolleri, acil onarım teknikleri ve kapsamlı rehabilitasyon programlarını kapsamaktadır. Çalışmanın bulguları, havalimanı pistlerinin deprem dayanıklılığını artırmak için entegre bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, tasarım aşamasından başlayarak, düzenli bakım ve güçlendirme çalışmalarını içeren kapsamlı bir risk yönetimi stratejisini gerektirmektedir. Literatür taraması ve geçmiş depremlerden elde edilen saha gözlemleri doğrultusunda, uygun iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasının pist yapılarının sismik performansını önemli ölçüde artırdığı sonucuna varılmıştır.

Earthquake-Induced Damages and Improvement Methods for Airport Runways

Article Info

Received: 01.06.2025
Accepted: 16.06.2025
Published: 30.06.2025

Keywords:

Earthquake damages,
Liquefaction,
Airport runways.

ABSTRACT

Airport runways are fundamental components of critical transportation infrastructure, requiring high resilience against natural disasters such as earthquakes. Earthquakes can cause significant structural and functional damage to critical transport infrastructure like airport runways. This study presents an analysis of the damage that occurs to airport runways under seismic effects and evaluates existing improvement and mitigation methods. Earthquakes induce various types of damage to runways. The main forms of damage observed due to seismic activity include soil liquefaction, settlement (including differential settlement), crack formation (surface cracking on the runway), surface deformations and structural distortions, drainage system failures, and losses in substructure stabilization. Runways constructed on alluvial soils are particularly vulnerable due to the high risk of liquefaction during earthquakes. Such damage can render runways inoperative, leading to significant delays in emergency response operations. Especially after high-magnitude earthquakes, the operational capacity of runways is observed to be severely affected. There are several pre- and post-earthquake ground improvement and mitigation measures that can be applied. From the perspective of mitigation strategies, current approaches involve both proactive and reactive measures. Proactive methods include the development of seismic design criteria, soil improvement techniques, and flexible pavement systems. Reactive methods comprise rapid damage assessment protocols, emergency repair techniques, and comprehensive rehabilitation programs. The findings of this study highlight the necessity of an integrated approach to enhancing the earthquake resilience of airport runways. This integrated strategy should encompass the entire lifecycle—from design to routine maintenance and strengthening activities—within a comprehensive risk management framework. Based on literature review and field observations from past earthquakes, it is concluded that the application of appropriate improvement methods significantly enhances the seismic performance of runway structures.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Fidan, B. (2025). Havalimanı pistlerinde deprem etkisi ile oluşan hasarlar ve iyileştirme yöntemleri. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 4(1), 62-77. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2025.1.5>

* Sorumlu Yazar: Bekir Fidan, bekirfidan@gmail.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Havacılık, günümüzde en kritik alanlardan biri olup, bu alanda yürütülen akademik çalışmalar farklı disiplinlerde yoğun bir şekilde devam etmektedir (Kaya vd., 2024; Kaya & Ervural, 2024; Kose & Kaya, 2018). Her ne kadar havacılıkla ilgili çalışmaların yalnızca küçük bir bölümü depremlerle doğrudan ilişkili olsa da bu çalışmalar özellikle acil durumlarda hayati önem taşımaktadır. Büyük ölçekli depremler sonrasında havaalanları; acil tıbbi müdahale ekiplerinin sevkıyatı, afet yardım malzemelerinin lojistiği ve ticari nakliye operasyonlarının sürekliliği gibi kritik işlevler üstlenmektedir. 2023 Pazarcık Depremi ve 1995 Kobe Depremi gibi yüksek magnitüdü depremlerden elde edilen veriler, kara ulaşım altyapısının işlevsiz hale geldiği durumlarda havaalanlarının stratejik bir erişim noktası olarak taşıdığı önemi açıkça ortaya koymuştur.

Havalimanı pistleri, depremler sırasında ve sonrasında işlevselliklerinin sürdürülmesi, acil müdahale, lojistik destek ve ticari faaliyetler için kritik bir altyapı unsurudur. Ancak bu yapılar, uzunlukları, rijit veya yarı rijit plak yapıları ve genellikle iyileştirme gerektiren zeminler üzerinde yer almalarından dolayı, özellikle dolgu veya kıyı alanlarında inşa edilen yapılar deprem kaynaklı hasar mekanizmalarına açıktır.

Bilimsel literatür incelendiğinde, pistlerdeki deprem kaynaklı hasar mekanizmalarının karakterizasyonu, önlenmesi ve onarımı yönünde odaklanmış araştırma çalışmaları olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar doğrudan (ör. yer sarsıntısı, sıvılaşma, anında çatlama ve oturma) ve dolaylı veya ikincil etkiler (ör. deprem sonrası oturma, uzun vadede taşıma gücü kaybı) üzerine yoğunlaşmaktadır. Japonya’da gerçekleştirilen çeşitli tam ölçekli saha deneylerinde, kontrollü patlatmalar ile sıvılaşma, tam özellikli pist plaklarının altında simüle edilmiştir. Bu çalışmalarda, pist yapı davranışı ve maliyet etkinliği gözetilen yoğunlaştırma yöntemleri gibi zemin iyileştirme tedbirlerinin performansı değerlendirilmiştir (Kasugai vd., 2008; Nakazawa vd., 2010; Nakazawa & Sugano, 2010). Bu deneylerde kullanılan optik fiber sensör gibi izleme yöntemleri sayesinde, sıvılaşma sırasında ve sonrasında meydana gelen kaplama deformasyonları ayrıntılı biçimde ölçülmüştür (Nakazawa & Sugano, 2010).

Grogan ve ark. (2000), 1989 Loma Prieta depremi sonrasında Oakland Havalimanı pistinde meydana gelen hasarları incelemiş, hasarın alttaki dolgu kum tabakasındaki sıvılaşmadan kaynaklandığı sonucuna ulaşmışlardır.

Zhang vd. (2011), Japonya HANEDA Uluslararası Havalimanı D pisti için GNSS izleme sistemi geliştirmiş, özellikle deprem sırasında yer değiştirme bilgilerinin kontrolünün havalimanı işletimi açısından kritik olduğu sonucuna varmışlardır.

Chhabra vd. (2024), doğal afetlerin havalimanlarında yapısal etkilere bağlı fonksiyonel kesinti süresini tahmin etmek için bir çerçeve geliştirmiş, terminal, kontrol kulesi ve pistler gibi ana bileşenlerin hasar durumuna göre iyileşme süresinin olasılıksal olarak tahmin edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Byrne vd. (1987), Vancouver Uluslararası Havalimanı’nda deprem aktivitesi nedeniyle sıvılaşma riskini incelemiş, onarım maliyetleri ile önleyici tedbirlerin ekonomik analizini yaparak hasarın meydana gelmesi durumunda onarım yapmanın daha ekonomik olduğu sonucuna varmışlardır.

Zhao vd. (2024), Alaska’daki Northway Havalimanı’nda permafrost bozulması ve sismik tehlike ilişkisini incelemiş, iklim değişikliği ve altyapı gelişiminin permafrost bozulmasına yol açtığı ve bunun deprem sırasında sıvılaşma gibi ciddi jeoteknik risklere neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ampirik çalışmaların yanı sıra, sayısal modelleme de deprem hasar mekanizmalarını analiz etmek için kullanılmıştır. Örneğin, üç boyutlu ve iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), pist kaplamalarında deprem yüklemesi sonucu meydana gelen çatlakların değerlendirilmesinde

kullanılmıştır; bu, 2007 Noto Hanto Depremi'nde olduğu gibi gerçek pistlerde gözlemlenmiştir (Hata vd., 2012). Tamamlayıcı olarak, zemin mühendisliği özelliklerine dayalı olasılıksal ve tek boyutlu analizler, pist inşaat alanlarında sıvılaşma potansiyelini nicel olarak belirlemek ve önleyici zemin iyileştirmesi gerekliliğini ortaya koymak için kullanılmıştır (Taftsoglou vd., 2024).

Deprem öncesi zemin iyileştirme teknikleri, önemli bir araştırma ve uygulama alanıdır. Titreşimli veya dinamik yoğunlaştırma yöntemleri, maliyet azaltıcı tasarım özelliklerine rağmen pist altındaki sıvılaşmadan kaynaklanan oturmaları azaltmak için tam ölçekli ortamlarda başarılı şekilde gösterilmiştir (Nakazawa vd., 2010; Nakazawa & Sugano, 2010). Kompaktif enjeksiyon ve yeni geliştirilen kavisli sondaj makineleriyle gerçekleştirilen kontrollü geçirgen enjeksiyon gibi daha ileri iyileştirme yöntemleri; operasyonel pistler hizmete ara vermeden altlarındaki zeminlerin iyileştirilmesine olanak sağlamıştır (Rasouli vd., 2016; Takano vd., 2013). Bu çalışmalar sadece etkinliği değerlendirmekle kalmamış, aynı zamanda maliyet, imalat kaynaklı yüzey yükselmeleri gibi pratik zorluklara ve operasyonel altyapı altında enjeksiyon karmaşıklıklarına da dikkat çekmiştir.

Bu önleyici tedbirlerin yanında, deprem sonrası onarım stratejilerine de odaklanılmaktadır. Havalimanı asfalt kaplamalarında ortaya çıkan çatlak, seviye farkı ve çukurların acil onarımı, hızlı müdahale sistemlerinin geliştirilmesi ve sıcak/soğuk karışım asfaltlar ile polimer bazlı çözümler dahil olmak üzere uygun onarım malzemelerinin değerlendirilmesiyle incelenmiştir (Hachiya vd., 1997; Hachiya & Takahashi, 2001). Pist kaplaması hasarının ciddiyetinin ve bakım-onarım işlemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi için, Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) verilerinden türetilen sapma indekslerinin kullanılması önerilmiş ve saha koşullarında doğrulanmıştır (Izzi vd., 2016).

Sonuç olarak, bu çalışmalar pistlerin deprem tehlikelerine karşı savunmasızlığını; saha bazlı doğrulama, sayısal modelleme, ileri zemin iyileştirme yöntemleri ve hızlı onarım stratejileri aracılığıyla ele almaktadır. Bireysel çalışmalar çoğunlukla ya önleyici iyileştirme ya da olay sonrası onarım üzerine odaklansa da topluca ele alındıklarında pist dayanıklılığını artırmak ve depremler sonrası işlevselliğin çabuk yeniden sağlanması için kapsamlı bir temel sunmaktadırlar.

YÖNTEM

Bu çalışmada, deprem kaynaklı havalimanı pisti hasarlarının mekanizmalarını ve iyileştirme yöntemlerini değerlendirmek için literatür taraması ve analitik yöntemler kullanılmıştır. Araştırma kapsamında, özellikle tam ölçekli saha deneyleri, sayısal modelleme ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler incelenmiştir. Çalışmanın kategorize edilmiş hali Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1

Çalışmaya Dair Kategorik Tablo

Kategori	Açıklama	Referanslar	Örnek Çalışmalar ve Bulgular
1.Tam Ölçekli ve Saha Çalışmaları (Runway Sismik Tepkisi ve Sıvılaşma Karşı Önlemler)	Depremde doğrudan ve ikincil hasarların etkilerini ve zemin iyileştirme yöntemlerinin etkinliğini inceleyen tam ölçekli veya saha testleri.	(Kasugai vd., 2008; Nakazawa vd., 2010; Ushijima vd., 2008)	Ishikari Körfezi'nde kontrollü patlatma testi; sıvılaşma altında pist performansı ve acil fonksiyon bağlamında karşı önlemlerin değerlendirilmesi.
2.Sayısal/Analitik Modelleme (Pistlerde Sismik Hasar Mekanizmaları)	FEM gibi yöntemlerle deprem yüklemesi altında pistlerde çatlama ve oturma mekanizmalarının analizi.	(Hata vd., 2012; Taftsoglou vd., 2024)	Noto Havaalanı pistinde 3B ve 2B doğrusal olmayan FEM analizi; çatlak oluşum indekslerinin değerlendirilmesi.
3.Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Değerlendirilmesi	Deprem öncesi zemin iyileştirme yöntemlerinin tasarımı ve etkinliğinin incelenmesi.	(Nakazawa vd., 2010; Rasouli vd., 2016; Takano vd., 2013)	Fukuoka Havaalanı'nda kavisli sondajla permeasyon enjeksiyonu; trafik kesintisi olmadan zemin iyileştirme başarısı.
4.Deprem Sonrası Değerlendirme, Bakım ve Hızlı Onarım	Çatlak/kırık kapatma, kaplama ve yapısal değerlendirme gibi acil onarım stratejileri.	(Hachiya vd., 1997; Hachiya & Takahashi, 2001; Izzi vd., 2016)	Asfalt pistlerde sıcak/soğuk karışım ve polimer bazlı malzemelerle acil onarım sisteminin geliştirilmesi.
5.İzleme Teknikleri ve Performans Değerlendirmesi	Sismik olaylar sırasında/sonrasında pist tepkisinin gerçek zamanlı izlenmesi ve yapısal bütünlük değerlendirmesi.	(Izzi vd., 2016; Ushijima vd., 2008)	Optik fiber sensörlerle sıvılaşma sırasında pist deformasyonlarının ölçülmesi.
6.Pistlerde Sıvılaşma Potansiyeline Yönelik Genel/Kavramsal Çalışmalar	Pistler için teorik veya olasılıksal sıvılaşma risk değerlendirmeleri.	(Taftsoglou vd., 2024)	Pist inşaat alanlarında 1D sıvılaşma potansiyeli analizi; yüksek riskli bölgelerin belirlenmesi ancak iyileştirme stratejilerinin detaylandırılmaması.

Tam Ölçekli Saha Deneyleri

Japonya'da Ishikari Bay bölgesinde gerçekleştirilen kontrollü patlatma deneyleri, sıvılaşmanın pist yapıları üzerindeki etkilerini ve Zemin iyileştirme yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmek için

kullanılmıştır (Kasugai vd., 2008; Nakazawa vd., 2010; Nakazawa & Sugano, 2010). Bu deneylerde, optik fiber sensörler gibi ileri izleme teknikleri kullanılarak deformasyonlar gerçek zamanlı olarak ölçülmüştür. Çalışmayla kıyı ve dolgu alanlar üzerine inşa edilen havalimanı pistlerinin sivilaşma dolayısıyla meydana gelen hasarları incelenmiş ve depreme karşı dirençli pistlerin inşaaı için strateji geliştirilmesi hedeflenmiştir. Hokkaido Adası'nda yer alan İshikari Körfezi'nde, sivilaşma koşullarında havaalanı tesislerinin davranışı tam ölçekli saha deneyiyle test edilmiştir. Deney kapsamında:

- Gerçek pist, apron ve hava trafik tesisleri yeniden inşa edilmiştir.
- Kontrollü patlatmalarla zeminde sivilaşma oluşturulmuştur.
- Farklı zemin iyileştirme yöntemlerinin etkinliği gözlemlenmiştir.

27 Ekim 2007 tarihinde Japonya'nın Hokkaido bölgesindeki Otaru şehrine bağlı Zenibako'da, Ishikari Körfezi Shinko Nishi bölgesinde, olası bir deprem felaketi durumunda havaalanı tesislerinin sivilaşma sırasında nasıl davrandığını gözlemlemek amacıyla tam ölçekli bir deney gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 1,65 hektarlık bir alanda yapılan bu deneyde, gerçek bir havaalanındakilere benzer asfalt kaplamalar, beton park apronları ve hava güvenliğine yönelik ışıklar, lokalizatörler, kayma hatları gibi tesisler birebir yeniden üretilmiştir. Deney sırasında, zemine yerleştirilen patlayıcıların kontrollü şekilde patlatılmasıyla büyük ölçekli bir zemin sivilaşması sağlanmış ve bu sayede yapay olarak oluşturulan havaalanı tesislerinin sivilaşma altındaki davranışı gerçekçi biçimde gözlemlenebilmiştir. Elde edilen veriler sayesinde, zemin sivilaşmasının yol açtığı deformasyonlar detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın üç temel hedefi bulunmaktadır: İlki, sivilaşma olgusunun ve bunun pistler ile navigasyon destek tesisleri üzerindeki etkilerinin anlaşılmasıdır. İkincisi, düşük iyileştirme oranı (%5) ve dar iyileştirme aralığı kullanılarak sivilaşma önlemlerinin etkinliğinin test edilmesidir; bu sayede maliyetlerin azaltılması ve inşaat süresinin kısaltılması hedeflenmiştir. Üçüncü hedef ise, afet durumlarında havaalanı tesislerinin kullanılabilirliğini tahribatsız yöntemlerle değerlendirerek sağlamlıklarının belirlenmesidir. Sivilaşma karşı önlemleri arasında statik basınçlı sıkıştırma (CPG) yöntemi ve enjeksiyon teknikleri yer almakta olup, bu çalışmada özellikle CPG yöntemine odaklanılmıştır. Deney kapsamında geleneksel 1,7 metrelik inşaat eğimi 2,0 metreye çıkarılmış, iyileştirme oranı %8'den %5'e düşürülerek uygulamanın etkinliği test edilmiştir. Ayrıca, sivilaşma sırasında oluşan boşluk suyu basıncının yayılımı incelenmiş ve zemin-gerilme davranışını belirlemek amacıyla CPG uygulaması öncesi ve sonrası K_0 (yatay/düşey gerilme oranı) değerleri ölçülmüş; sivilaşma sonrası altı aylık süreçte bu ölçümlerin devam ettirilmesi planlanmıştır.

Sayısal Modelleme

Üç boyutlu ve iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi (FEM), deprem yüklemesi altında pist kaplamalarında oluşan çatlakların mekanik davranışını simüle etmek için uygulanmıştır (Hata vd., 2012; Taftoglou vd., 2024). Bu modeller, sivilaşma potansiyelinin haritalanması ve zemin iyileştirme yöntemlerinin tasarımı için kullanılmıştır.

Depremelerin sebep olduğu ikincil etkiler (özellikle zemin sivilaşması) havaalanı altyapıları için ciddi tehditler oluşturur. Yunanistan'ın Trakya bölgesi Nestos Deltasında, sığ yeraltı jeolojisi ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak havaalanı alanlarında sivilaşma riski haritalanması ve risk analizi yapılması hedeflenmiştir. Yöntem, pratik, hızlı ve yerel ölçekte uygulanabilir bir araç sunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen yöntem, havaalanı altyapılarının sivilaşma tehlikesine karşı yerel ölçekte değerlendirilmesini amaçlayan dört aşamalı bir analiz çerçevesidir. Yöntem, yüzey jeolojisinin sivilaşma duyarlılığına etkisini geomorfolojik ve jeolojik analizler yoluyla değerlendirerek uygulanabilir ve hızlı bir sivilaşma duyarlılık haritalaması sağlar. Çalışmanın ilk aşamasında jeolojik ve tarihsel veriler toplanmıştır. Bu aşamada, çalışılan bölgeye ait mevcut jeolojik haritalar, tarihsel hava

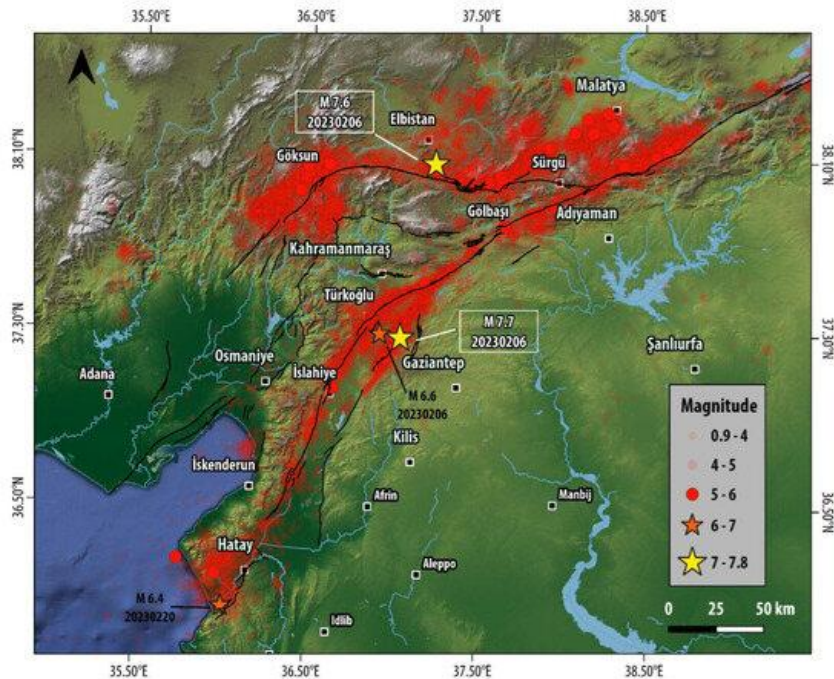
fotoğrafları, uydu görüntüleri (ör. KH-4 serisi 1960–1968), topografik veriler (sayısal yükseklik modeli - DEM) ve diğer kartografik kaynaklar derlenmiştir. Bu veriler sahanın sedimanter yapısının, geomorfolojik evriminin, tarihsel arazi kullanım değişimlerinin belirlenmesini sağlamıştır. İkinci aşamada geomorfolojik birimlerin haritalanması çalışmaları yapılmıştır. Toplanan veriler ışığında, nehir meandırları, terk edilmiş kanal yatakları, deltaik oluşumlar, lagünler, kumullardan oluşan geomorfolojik birimler tespit edilmiştir. Bu özellikler, sıvılaşmaya yatkınlığı yüksek olan genç, gevşek, doymuş çökellerin varlığını işaret eder. Haritalama sürecinde ise DEM verileriyle eğim ve drenaj analizi, uydu görüntüleriyle birebir eşleşen arazi formlarının doğrulanması, yeni bir geomorfolojik sınıflama haritasının üretilmesi çalışmaları yapılmıştır. Üçüncü aşamada jeolojik birimlerin sıvılaşma duyarlılığına göre sınıflandırılması yapılmıştır. Bu aşamada, yüzey jeolojisi birimleri, depozisyon yaşı (örneğin: Holosen, Pleyistosen), ortam tipi (flüviyal, kıyasal, deltaik), malzeme tipi ve yeraltı suyu derinliği dikkate alınarak sınıflandırılmıştır. Dördüncü ve son aşamada sıvılaşma duyarlılık haritasının oluşturulması gerçekleştirilmiştir. Bu haritada pist, taksi yolları ve apron gibi altyapıların hangi sıvılaşma sınıfında yer aldığı görsel olarak analiz edilmiştir. Harita, risk analizinin temel girdisini oluşturur ve havaalanı tesislerinin zemin koşullarına göre ne ölçüde tehdit altında olduğunu ortaya koyar. Sayısal modelleme ile arazi çalışması gerektirmeden, mevcut uzaktan algılama ve harita verileriyle hızlı analiz yapılabilir. Genç alüvyon, deltaik alanlar gibi sıvılaşmaya hassas bölgelerde özellikle güvenilir sonuçlar verir. Risk analizinde FEMA HAZUS modeliyle entegre edilerek doğrudan ekonomik kayıp tahmini yapılabilir. Bu yöntem, özellikle hızlı tarama ve ön değerlendirme yapmak isteyen karar vericiler ve mühendisler için oldukça pratik ve düşük maliyetli bir alternatiftir.

Uzaktan Algılama Yöntemi

Mw 7.7 (Pazarcık) ve Mw 7.6 (Elbistan) büyüklüğündeki çift ana şoklu deprem, Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca yüzey kırığı oluşturmuş ve toplam yüzey kırığı uzunluğu yaklaşık olarak 350 km'ye ulaşmıştır. 20 Şubat'ta Hatay Yayladağ'da Mw 6.4 büyüklüğünde artçı bir deprem daha meydana gelmiştir (Şekil 1).

Şekil 1

6 Şubat ve 20 Şubat'ta meydana gelen depremler. Kaynak: Taftisoglou vd. (2023) CC BY 4.0 lisansı kapsamında yeniden üretilmiştir.



6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğündeki depremler sonrası sıvılaşma kaynaklı hasarların en yoğun olduğu Hatay Havalimanı ve Amik Ovası'nda meydana gelen sıvılaşma olayları, uzaktan algılama teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Öncelikle bölgenin jeolojik ve jeomorfolojik özellikleri değerlendirilmiş, ardından sıvılaşmaya duyarlı zeminlerin mekânsal dağılımı analiz edilmiştir.

Amik Ovası, Plio-Kuvaterner yaşlı kalın alüvyon çökelleri ile doldurulmuş, topoğrafik olarak düz ve yüksek yeraltı su seviyesine sahip bir çöküntü alanıdır. Amik Gölü, geçmişte ovanın merkezi kısmını kaplarken, sonradan yapay tahliye kanalları (Balıkgölü Kanalı) ile kurutulmuştur. Bu nedenle, günümüzde hala yüksek yeraltı su seviyesi ve gevşek, doymuş tortul zemin yapısı hakimdir. Bu ise sıvılaşma için son derece elverişli bir ortam sağlar. Hatay Havalimanı, geçmişte Amik Gölü olarak bilinen bu alanın kurutulmuş bataklık zeminine inşa edilmiştir. Bu özellikleriyle bölge, sıvılaşma açısından oldukça yüksek risk taşımaktadır.

Veri kaynağı olarak yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri kullanılmıştır. Maxar WorldView (0.3–0.7 m), Sentinel-2 (10 m) optik görüntüler ve Sentinel-1A radar verileri (InSAR) elde edilmiştir. Görüntüler, depremlerden hemen sonra elde edilen analiz-ready formatta işlenmiş ve deformasyon tespiti amacıyla görsel olarak incelenmiştir. Uydu görüntüleri; sıvılaşma kaynaklı yüzey deformasyonlarını (örneğin, çatlaklar, oturma, kum fıskırmaları) tespit etmekte kullanılmıştır. InSAR verileri ise yüzey deformasyonlarının büyüklüğünü ve yayılımını koherens kaybı ve girişim desenleri (fringe) üzerinden analiz etmek için kullanılmıştır (Taftoglou vd., 2023).

Özellikle Amik Ovası'nın eğimi düşük, suya doymuş ve gevşek zeminli alanları ile nehir meandraları boyunca odaklanılmış; pist dolgu gibi yapay zeminler özel olarak incelenmiştir. Görsel tanıma yöntemi, yüksek kar ve sel örtüsü nedeniyle yarı otomatik yöntemlere tercih edilmiştir.

Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin güçlendirmesi veya zemin rehabilitasyonu ile ilgili pek çok yöntem bulunmaktadır. Bunlar dinamik kompaksiyon ve vibro kompaksiyon olmak üzere sıkıştırma tabanlı yöntemler, çimento enjeksiyonu (Jet Grouting) ve kimyasal enjeksiyon (permeation grouting) olmak üzere enjeksiyon tabanlı yöntemler, kum kazıkları ve dikey drenajlar (prefabricated vertical drains, pvd) olmak üzere drenaj tabanlı yöntemler, jet kazıklar ve mini kazıklar gibi derin kazık sistemleri, zemine kireç, çimento, uçucu kül gibi katkıları karıştırarak yapılan mekanik stabilizasyon, geosentetik donatılarla zeminin takviyesi, biyolojik stabilizasyon, şok dalgası ile sıkıştırma gibi yöntemler, CPG, derin karıştırma (DSM) olarak sıralanabilir. Son yıllarda ise farklı türde zemin güçlendirme yöntemleri çalışılmıştır (Fidan vd., 2024; Olgun vd., 2019; Özkan, 2024; Senkaya vd., 2022; Soğancı & Orman, 2024; Yenginar vd., 2024; Yenginar & Olgun, 2024). Uygun olmayan zemin koşulları üzerine inşa edilen mühendislik yapıları deprem etkisiyle yapının kullanılamayacak duruma gelmesi veya tamamen hasar görmesi gibi ciddi hasarlar alabilmektedir. Havalimanı pistlerinin zemin güçlendirme yöntemleri, yüksek güvenlik, dayanıklılık ve uzun ömür gerektiren bu yapıların deprem, sıvılaşma ve taşıma gücü yetersizlikleri gibi geoteknik sorunlara karşı korunması amacıyla uygulanmaktadır. Bu yöntemler, zeminin fiziksel, mekanik veya hidrolik özelliklerini iyileştirmeye yönelik çeşitli teknikleri kapsar.

Titreşimli yoğunlaştırma, kompaktif enjeksiyon ve kontrollü geçirgen enjeksiyon gibi tekniklerin etkinliği, hem saha deneyleri hem de laboratuvar testleri ile doğrulanmıştır (Nakazawa vd., 2010; Rasouli vd., 2016; Takano vd., 2013). Bu yöntemlerin maliyet, uygulanabilirlik ve operasyonel süreklilik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda Ishikari Körfezi'nin kıyı zonunda yer alan deniz tabanındaki hafif eğimli morfolojik yapı, mekanik tarama sonucu kazanılan kum ve kumul materyallerinin kontrollü dolgu uygulamalarıyla stabilize edilerek oluşturulan sahaya bir pist yapısı inşa edilmiştir. Sahayı oluşturan zemin tabakası en altta Nispeten sağlam, düşük geçirgenlikli kil ve çakıl

karişımı tabaka, bu tabakanın üzerinde orta sertlikte kum ve siltli kum katmanları, bu tabaka üzerinde ise gevşek kum/silt karişımı yüksek sıvılaşıma potansiyeline sahip, doygun ve düşük mukavemetli bir tabaka yer almaktadır. En üstte üse pisti oluşturan yaklaşık 0.3–0.5 m kalınlığında asfalt-beton kaplama yer almaktadır. Yer altı su seviye ise yüzeyden 2,5-3 metre derinlikte konumlanmıştır.

Bu zemin profili, özellikle üstteki doygun gevşek kum tabakası nedeniyle sıvılaşmaya son derece duyarlıdır. Dolayısıyla deney kapsamında seçilen iyileştirme yöntemlerinin performansı, hem bu zemin koşullarına hem de sınırlı iyileştirme oranlarıyla ne ölçüde başarılı olabildiklerine göre değerlendirilmiştir.

Mevcut zemin koşullarında sahanın bir kısmı sıkıştırma enjeksiyon yöntemi veya statik basınçlı sıkıştırma adı verilen CPG yöntemi ile diğer bir kısmı ise kimyasal enjeksiyon yöntemi (CGM) ile güçlendirilmiştir. Alanın bir kısmı ise kontrol gözlemi amaçlı herhangi bir zemin iyileştirme/güçlendirme işlemine tabi tutulmamıştır. Japonya'da yaygın olarak CPG olarak bilinen Sıkıştırma Enjeksiyon Yöntemi, zemin sıvılaşmasını önlemeye yönelik etkili bir iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemde, toprak-çimento-su karişımının kontrollü enjeksiyonu yoluyla zemin yoğunluğu artırılmaktadır. Mevcut CPG spesifikasyonları, iyileştirilmiş zemin matrisinde meydana gelen boşluk oranındaki azalmanın yoğunluk artışına yol açtığı temel prensibine dayanmaktadır. Bu tasarım yaklaşımında, zeminde oluşan hacimsel değişimin, enjekte edilen grout malzemesinin hacmine eşdeğer olduğu varsayımı kabul edilmektedir.

CGM ise zeminin sıvılaşıma direncini artırmak amacıyla, aşırı boşluk suyu basıncının efektif düşey gerilmeyi aşmasını engelleyecek şekilde, boşluk suyunun polimerik jel ile kalıcı olarak yer değiştirmesi prensibine dayanan bir zemin stabilizasyon tekniğidir.

Acil Onarım Stratejileri

Deprem sonrası pist hasarlarının hızlı onarımı için sıcak/soğuk karişım asfaltlar ve polimer bazlı malzemeler gibi çözümler değerlendirilmiştir (Hachiya vd., 1997; Hachiya & Takahashi, 2001). Ayrıca, Düşen Ağırlık Deflektometresi (FWD) gibi yapısal değerlendirme araçları kullanılarak onarım etkinliği ölçülmüştür (Izzi vd., 2016). Çalışmada havaalanı asfalt kaplamalarında deprem sonrası oluşan hasarlara yönelik acil onarım sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada, öncelikle deprem kaynaklı yapısal bozulmalar ve onarım gereklilikleri kapsamlı şekilde değerlendirilmiş, ardından acil müdahale yöntemleri araştırılmıştır. Yüzey deformasyonlarının niceliksel analizi için, çatlaklı ve sağlam bölgelerdeki esneklik farklılıklarını ölçmek amacıyla FWD kullanılmıştır. Havaalanlarında hasar gören kaplamaların acil onarımı için, malzemelerin sahada depolanabildiği ve büyük ölçekli üretim ya da inşaat tesislerine ihtiyaç duyulmadan onarımların kolaylıkla yapılabilirdiği bir sistem geliştirilmiştir.

Yine başka bir çalışmada ise havaalanı asfalt kaplamalarının durumunu tahribatsız ve hızlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla geliştirilen Enhanced Resonance Search (ERS) tekniği detaylandırılmaktadır (Izzi vd., 2016). Bu yöntem, Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) ve rezonans arama yöntemlerinin birleşimiyle çalışmakta olup, yüzeyden alınan darbelerle oluşturulan sismik dalgaların asfalt tabakalarında yayılımı incelenerek elastik modül ve tabaka kalınlıkları belirlenmektedir. ERS yöntemi, Pi-Scanner adı verilen özel bir cihaz ile uygulanmaktadır. Pi-Scanner; bir darbe çekici, iki ivmeölçer içeren bir sensör ünitesi ve bu verileri analiz eden özel yazılımlı taşınabilir bir bilgisayardan oluşur. Cihaz, rezonans frekansını otomatik olarak hesaplayan algoritmalar sayesinde veri toplama ve analiz süreçlerini hızlandırmaktadır. Çalışmada, Malezya'daki bir havaalanında dört farklı taksi yolunda bu yöntem uygulanmış, her bir noktada kesme dalgası hız profili ve üst tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen veriler, daha önce aynı bölgelerde uygulanmış olan kor numunesi alma ve DCP testleriyle karşılaştırılmış, böylece ERS yönteminin doğruluğu ve saha uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, hem asfalt hem de alt tabakalardaki elastisite

değişimini tespit etmede etkili olmuş ve saha koşullarında hızlı karar alma süreçlerine destek sunacak nitelikte sonuçlar üretmiştir.

Bu yöntemler, pistlerin deprem dayanıklılığını artırmak için hem önleyici hem de reaktif stratejilerin entegrasyonunu sağlamıştır.

BULGULAR

Çalışmanın sonuçları, depremlerin havalimanı pistleri üzerindeki etkilerini ve iyileştirme yöntemlerinin performansını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır:

Hasar Oluşumları ve Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Etkinliği

Depremler, özellikle dolgu veya kıyı alanlarında inşa edilen pistlerde sıvılaşma, çatlama ve oturma gibi ciddi hasarlara neden olmaktadır. Tam ölçekli deneyler, sıvılaşma sonrasında pist yüzeyinde 10-15 cm'ye varan düzensiz oturmaların meydana geldiğini göstermiştir (Kasugai vd., 2008; Nakazawa & Sugano, 2010). İkincil etkiler arasında, deprem sonrası yeniden konsolidasyon nedeniyle zamanla artan oturmalar ve taşıma kapasitesi kaybı gözlemlenmiştir (Nakazawa vd., 2010; Nakazawa & Sugano, 2010). Titreşimli yoğunlaştırma, sıvılaşma kaynaklı oturmaları %50-70 oranında azaltmıştır (Nakazawa vd., 2010). Kontrollü geçirgen enjeksiyon (örneğin, koloidal silika), operasyonel pistler altında uygulanabilirliği ve yüksek performansı nedeniyle öne çıkmıştır (Rasouli vd., 2016). Kompaktif enjeksiyon, zeminin taşıma kapasitesini artırmakla birlikte, yüzeyde heave (kabarma) riski gibi pratik sınırlamalara sahiptir (Takano vd., 2013). Zemin sıvılaşması sonrası pist davranışı ve iyileştirme yöntemlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. İyileştirme yapılmamış kontrol bölgesinde, patlamayla tetiklenen aşırı boşluk suyu basıncı (Δu), efektif düşey gerilmeye (σ_v') eşitlenerek tam sıvılaşma meydana gelmiş, bu da 35 cm'den fazla oturma ve pist eğiminde %1.5'i aşan deformasyonlara yol açmıştır. Buna karşılık, CPG uygulanan bölgelerde Δu 'nun artışı daha yavaş gerçekleşmiş ve σ_v' 'nin yalnızca %50-70'ine ulaşarak sıvılaşma sınırının altında kalmıştır; bu alanlarda oturma miktarı da kontrol bölgesine göre %10'un altında kalmıştır. Benzer şekilde, CGM uygulanan alanlarda iyileştirme oranı %25-70 arasında değişse de Δu genellikle σ_v' 'nin %20-60'ı ile sınırlı kalmış ve üst tabakalardaki enjeksiyon uygulaması, alt tabakalarda yüksek Δu değerlerine rağmen önemli çökmeleri engellemiştir. Fonksiyonel açıdan bakıldığında, iyileştirilmemiş alanlardaki eğim deformasyonları pist kullanımını engelleyici seviyelere ulaşmışken, CPG ve CGM uygulanan bölgelerde eğim değerleri kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Çökmelerin büyük kısmı (%90) ilk bir saat içinde gerçekleşmiş ve bu da sıvılaşma sonrası deformasyonun zamansal dağılımına ışık tutmuştur. Ayrıca, geleneksel tasarıma kıyasla iyileştirme oranının %5'e düşürülmesi ve iyileştirme aralıklarının 2 metreye çıkarılması gibi maliyet azaltıcı stratejiler, CPG uygulamasında performans kaybına yol açmadan uygulanabilmiş; CGM'de ise yalnızca %25 iyileştirme oranıyla dahi çökmeler kritik sınırların altında tutulabilmektedir. Bu bulgular, düşük maliyetli ve sınırlı iyileştirme stratejilerinin havaalanı altyapısında sıvılaşmaya karşı etkili olabileceğini göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2

İki Farklı Zemin İyileştirme Yöntemine Göre Elde Edilen Sonuçlar

Parametre	İyileştirilmemiş Alan	CPG Uygulaması	CGM Uygulaması
Maks. Çökme	>35 cm	<3.5 cm	<5 cm
$\Delta u/\sigma_v'$	1.0	0.5-0.7	0.2-0.6
Eğim (%)	>1.5	<1.0	<1.0

Acil Onarım Stratejileri

Polimer modifiyeli soğuk karışım asfaltlar, çatlak ve boşlukların hızlı onarımında etkili olmuştur

(Hachiya vd., 1997; Hachiya & Takahashi, 2001). Deprem sonrası havaalanı pistlerinin hızlı ve etkili şekilde onarılabilmesi için farklı onarım materyallerinin performansları değerlendirilmiştir. Ana havalimanlarında kullanılmak üzere önerilen toz asfalt bazlı ısıtılmalı karışım, yüksek Marshall stabilitesi (≥ 9 kN) ve 60°C'de dahi sağladığı 1.200 devir/mm'lik yüksek dinamik stabilitesiyle öne çıkmıştır. Bölgesel havalimanları içinse, düşük ekipman gereksinimi sayesinde sahada kolaylıkla uygulanabilen reçine bazlı soğuk karışım önerilmiştir; bu malzeme 5°C gibi düşük sıcaklıklarda 5 saat içinde, 20°C'de ise yalnızca 1 saatte yeterli mukavemete ulaşabilmiştir. Çatlak onarımlarında, 3 mm'ye kadar olan dar çatlakları 5 dakikada doldurabilen asfalt bazlı soğuk enjeksiyon malzemesi, reçine bazlı ürünlere kıyasla %30 daha yüksek yapışma mukavemeti göstermiştir. Ayrıca -10°C ile 40°C arasında esnekliğini koruyarak uzun vadeli dayanıklılık sunmuştur. Uygulama kolaylığı açısından, toz asfalt karışımları küçük ölçekli ısıtıcılar ile hazırlanmakta ve 6 ay boyunca depolanabilmekte; reçine bazlı karışımlar ise karıştırma gerektirmeden 1 yıla kadar raf ömrü sunmaktadır. Asfalt enjeksiyon malzemesi ise -20°C'ye kadar dayanabilmekte ve hazır enjektörlerle doğrudan uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, reçine bazlı ürünlerin yüksek sıcaklıklarda ($>40^{\circ}\text{C}$) deformasyona eğilimli olması ve toz asfalt uygulamasının enerjiye bağımlı olması gibi sınırlamalar da tespit edilmiştir. Bu nedenle, ileri çalışmaların özellikle bu malzemelerin uzun vadeli performansı ve hibrit (kompozit) uygulamalar üzerine yoğunlaşması önerilmektedir.

FWD tabanlı sapma analizleri, onarım sonrası pist yapısının mekanik bütünlüğünün %80-90 oranında restore edildiğini doğrulamıştır (Izzi vd., 2016). Kaplama kalınlığı açısından, ERS ile elde edilen ölçümler, kor numunesi alma ve DCP yöntemleriyle büyük oranda örtüşmüştür. Ancak, ölçüm zamanlarındaki farklar ve arada gerçekleştirilen rehabilitasyon çalışmaları (örneğin, Taksi Yolu 3'te %35,7 sapma) bazı farklılıklara yol açmıştır. En düşük fark (%8,62) ise Taksi Yolu 4'te kaydedilmiş ve bu durum, ERS yönteminin kararlı zemin koşullarında güvenilir olduğunu göstermiştir. Rezonans arama tekniği, yüzey dalgası hızının analiz edildiği SASW yöntemini destekleyerek üst tabaka kalınlıklarının daha doğru belirlenmesine katkı sağlamıştır. Kaplama sertliğinin değerlendirilmesinde, ERS ve Ağırlıklı Deflektometre (HWD) karşılaştırıldığında, genellikle ERS ile ölçülen elastik modül değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Taksi Yolu 2'de bu fark oldukça belirgindir (ERS: 3.890 MPa, HWD: 699 MPa). Bu durumun, yaşlanma etkisi ve ölçüm sırasındaki sıcaklık farklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, rehabilite edilmiş Taksi Yolu 3'te ERS değeri HWD'den daha düşük çıkmış, bu da iyileştirme sonrası daha yumuşak bir üst tabakanın varlığını göstermektedir. ERS'nin sunduğu küçük deformasyon modülü, HWD ile uyumlu ve sahada detaylı mühendislik analizlerine olanak sunmaktadır. Pi-Scanner cihazının otomatik rezonans hesaplama özelliği sayesinde hızlı ve pratik veri analizi yapılabilmüş, bu da yöntemin periyodik izleme çalışmalarına uygun olduğunu ortaya koymuştur. Ancak ölçüm zamanlamalarındaki tutarsızlıklar ve lokal onarım etkileri, sonuçların doğruluğunu sınırlayabilmektedir. Bu nedenle, ERS, HWD ve korozyon testlerinin eş zamanlı uygulanması ile birlikte, sıcaklığa bağlı sertlik değişimlerini dikkate alan düzeltme modellerinin geliştirilmesi gelecekteki çalışmalar için önerilmektedir.

Uzaktan Algılama Yöntemi ile Hasar Tespitleri

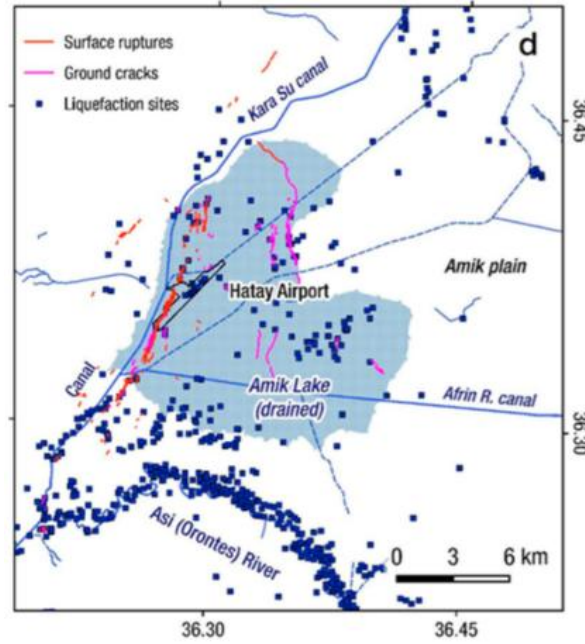
Yapılan analizlerde, Hatay Havalimanı ve çevresinde sıvılaşma kaynaklı ciddi deformasyonlar tespit edilmiştir. Havalimanının doğu bölümünde pist dolgusunda meydana gelen sıvılaşma nedeniyle yüzey oturması, enlemesine ve uzunlamasına çatlaklar ve asfalt deformasyonları ve asfaltta çökmeler belirlenmiştir. Bu hasarlar pistin kullanılmaz hale gelmesine neden olmuş, havalimanı yaklaşık altı gün süreyle hizmet dışı kalmıştır.

Amik Ovası genelinde ise, özellikle Asi (Orontes) Nehri boyunca yoğun sıvılaşma belirtileri tespit edilmiştir (Şekil 2). Bunlar arasında kum fişkirmaları, yüzey çatlakları ve lateral yayılmalar yer almaktadır. Uydu görüntülerinde, eski nehir kolları, terk edilmiş meandrallar ve kurutulmuş bataklık

alanlar üzerinde sıvılaşma izlerine rastlanmıştır. Sentinel-1A verileri ile yapılan InSAR analizinde, Amik Ovası'nın doğu kesiminde düzensiz fringe desenleri ve belirgin koherens kaybı saptanmıştır (Taftsoglou vd., 2023). Bu bulgular, yüzey deformasyonlarının büyük oranda sıvılaşma kaynaklı olduğunu göstermektedir.

Şekil 2

Hatay Havalimanı, Asi Nehri ve Amik Ovasında Meydana Gelen Zemin Sıvılaşmaları.
Kaynak: Taftsoglou vd. (2023) CC BY 4.0 lisansı kapsamında yeniden üretilmiştir.



Sayısal olarak değerlendirildiğinde, Amik Ovası'ndaki sıvılaşma noktaları toplam haritalanan olayların yaklaşık %35'ini oluşturmaktadır. Ayrıca, Asi Nehri boyunca uzanan 50 km'lik kesitte 563 sıvılaşma noktası tespit edilmiştir. Havalimanı yakınındaki kanal sistemleri boyunca ise yüzey su çıkışları sonucu yaklaşık 5 km²'lik alanın geçici olarak su altında kaldığı gözlenmiştir.

Bu bulgular, Amik Ovası'nın ve Hatay Havalimanı'nın sıvılaşmaya yüksek derecede duyarlı zemin özelliklerine sahip olduğunu, ayrıca bu tip yapay dolgulu altyapıların sismik risk altında önemli mühendislik sorunları doğurabileceğini ortaya koymaktadır. Uzaktan algılama ile büyük depremler sonrası hızlı ve geniş kapsamlı sıvılaşma tespiti için etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Bu yöntem, gelecekteki saha çalışmaları için rehber olabilir; ayrıca acil durum yönetimi ve mühendislik planlamasına katkı sunar.

Entegre Yaklaşımın Önemi

Tek bir yöntemin (örneğin, sadece zemin iyileştirme veya sadece onarım) yetersiz kaldığı durumlarda, önleyici ve reaktif stratejilerin kombinasyonu en yüksek dayanıklılığı sağlamıştır. Örneğin, Fukuoka Havalimanı'nda permeasyon enjeksiyonu ve acil onarım malzemelerinin birlikte kullanımı, deprem sonrası pistin 48 saat içinde hizmete geri dönmesini sağlamıştır (Rasouli vd., 2016).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, havalimanı pistlerinin deprem dayanıklılığını artırmak için çok yönlü bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Deprem kaynaklı hasarların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması için aşağıdaki stratejiler önerilmektedir:

Önleyici Tedbirler:

- Zemin iyileştirme yöntemleri (örneğin, yoğunlaştırma, enjeksiyon) pist tasarım aşamasında entegre edilmeli ve sıvılaşma riski yüksek bölgelerde önceliklendirilmelidir.
- FEM ve saha verilerine dayalı risk haritalama, zayıf noktaların belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır.

Reaktif Stratejiler:

- Acil onarım malzemelerinin standardizasyonu ve havalimanı ekiplerinin bu malzemeleri kullanma becerilerinin geliştirilmesi gereklidir.
- Yapısal izleme sistemleri (örneğin, optik fiber sensörler) ile gerçek zamanlı hasar tespiti, onarım süreçlerini hızlandırabilir.

Gelecek Çalışmalar:

- İkincil oturma ve uzun vadeli taşıma kapasitesi kaybı gibi konularda daha fazla saha verisi toplanmalıdır.
- Uluslararası standartlar (FAA/ICAO) ile uyumlu performans kriterleri geliştirilerek, iyileştirme yöntemlerinin etkinliği nicel olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, havalimanı pistlerinin depreme karşı direnci, tasarım, inşaat, izleme ve bakım aşamalarını kapsayan bütüncül bir risk yönetimi stratejisi ile sağlanabilir. Bu yaklaşım, pistlerin operasyonel sürekliliğini ve güvenliğini artırarak, afet sonrası toparlanma sürecine önemli bir katkı sağlayacaktır.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışma için etik kurulu onayı gerekmemektedir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%100)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%100)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%100)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%100)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%100)

Finansman

Çalışma herhangi bir kurum tarafından desteklenmemiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarın bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERANSLAR

- Byrne, P. M., Anderson, D. L., Atukorala, U., & Joseph, A. (1987). Seismic risk at Vancouver International Airport (liquifaction). *Earthquake engineering. Proc. 5th Canadian conference, Ottawa, 1987, (Balkema)*, 577-586. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0023469975&partnerID=40&md5=f53dc0edbbf45f5e5f78571975084c68>
- Chhabra, J. P. S., Yi, Z., Kim, Y., Pant, D. R., Brunelle, G., & Patel, S. (2024). A Framework for Airport Functional Downtime Estimation due to Structural Impacts under Natural Hazards. *Proceedings of the 8th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, ISRERM 2022*, 763-770. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85202043013&doi=10.3850%2f978-981-18-5184-1_GS-03-091-cd&partnerID=40&md5=3edcf94d0acf6b39dd7a3a5679ddd584
- Fidan, B., Yenginar, Y., & Olgun, M. (2024). A Case Study: Cost-Benefit and Risk Analyses of Gabion Wall for Rockfall Protection Method in Bozkir, Turkey. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(4), 865-885.
- Grogan, W. P., & Vallergera, B. A. (2000). Earthquake damage and repair of Oakland Airport Runway. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 14(4), 135-140. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034324216&doi=10.1061%2f%28ASCE%290887-3828%282000%2914%3a4%28135%29&partnerID=40&md5=4e51d403582bd7192080d6c9599720c1>
- Hachiya, Y., & Takahashi, O. (2001). Emergency Repair System For Earthquake-Induced Distress in Airport Asphalt Pavements. *Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control. Segundo Simposio Sobre Manutencao e Rehabilitacao de Pavimentos e Controle Tecnológico*. <https://doi.org/10.3390/buildings14113587>
- Hachiya, Y., Yin, J., & Murozono, M. (1997). Materials For Urgent Repair Of Earthquake Induced Damages In Airport Asphalt Pavements. *Journal of Pavement Engineering, JSCE*, 2, 257-262.
- Hata, Y., Ichii, K., & Nozu, A. (2012). Seismic damage assessment of an airport runway based on non-linear FEM analysis with special reference to crack occurrence. *Electrical Measuring Instruments and Measurements*, 41.
- Izzi, N., Yusoff, M. D., Anuar, K., Nayan, M., Amiruddin, İ., Norinah, A. B. D., & Muhammad, M. (2016). *Evaluation of Asphalt Pavement at Airport Using Seismic Technique*.
- Kasugai, Y., Ushijima, R., Mizukami, J., Asayama, K., Nakazawa, H., & Sugano, T. (2008). Earthquake Resistance Improvement Strategy Of Reclaimed Airport Located In Coastal Area And Functional Disorder Of Airport Facilities During Liquefaction. *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean*, 24, 237-242.
- Kaya, M. N., Büyükzeren, R., Bacakoğlu, A. A., Uçar, M., Altıntaş, H. B., Öztürk, A., & Bilici, A. Y. (2024). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kule Yüksekliği ve Türbülans Yoğunluğu Etkisinin İncelenmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 566-582. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.66>
- Kaya, M. N., & Ervural, B. (2024). On the Advanced Optimization Techniques for the Aerodynamic Design of Turbomachinery. İçinde S. Koçer & Ö. Dündar (Ed.), *Intelligent Systems and Optimization in Engineering* (ss. 80-97). ISRES Publishing.

- Kose, F., & Kaya, M. N. (2018). Wind-Hydro Pumped Storage Power Stations to Meet the Energy Demands of Irrigation: Feasibility, Optimal Design and Simulation of a System. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 39(2), 223-232.
- Nakazawa, H., & Sugano, T. (2010). *Full-Scale Field Test on Liquefaction-Induced Damage of Runway Pavement by Controlled Blast Technique*.
- Nakazawa, H., Sugano, T., Adachi, M., Yamada, K., Oosawa, K., Shinsaka, T., & Harada, Y. (2010). Full-Scale Field Test on Estimation of Countermeasure for Liquefaction by Densification Method for Runway Pavement. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 59(1), 8-13.
- Olgun, M., Fidan, B., & Yenginar, Y. (2019). Model studies of lateral soil pressure on drilling piles in dry and saturated sands. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56(4), 280-286.
- Özkan, İ. (2024). Şişen Zeminlerin Isırgan Otu İle İyileştirilmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2).
- Rasouli, R., Hayashi, K., & Zen, K. (2016). Controlled permeation grouting method for mitigation of liquefaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(11), 04016052.
- Senkaya, A., Ekrem, ., Toka, B., & Murat Olgun, . (2022). Effects of Cement Grout Characteristics on Formation and Strength of Jet Grouting Columns. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 13035-13047. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06678-9>
- Soğancı, A. S., & Orman, A. (2024). The Influence of Polypropylene Fiber on High and Low Plasticity Clay. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 178-187.
- Taftoglou, M., Valkaniotis, S., Papathanassiou, G., & Argyroudis, S. (2024). Liquefaction risk assessment of airport infrastructure using geological data and remote sensing techniques. *İçinde Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society* (ss. 1350-1355). CRC Press.
- Taftoglou, M., Valkaniotis, S., Papathanassiou, G., & Karantanellis, E. (2023). Satellite imagery for rapid detection of liquefaction surface manifestations: The case study of Türkiye–Syria 2023 earthquakes. *Remote Sensing*, 15(17), 4190.
- Takano, D., Nishimura, S., Takehana, K., Morikawa, Y., & Takashi, H. (2013). The effect of compaction grouting as a countermeasure against liquefaction. *地盤工学ジャーナル (Web)*, 8(1), 81-95.
- Ushijima, R., Kasugai, Y., Mizukami, J., Nakatani, Y., Nakazawa, H., & Sugano, T. (2008). Experimental study on deformation of runway induced by liquefaction in airport constructed in waterfront reclaimed land. *Proceedings of Civil Engineering in The Ocean*, 24, 279-284.
- Yenginar, Y., Fidan, B., & Olgun, M. (2024). Effect of pile geometry and soil saturation degree on point bearing capacity for bored piles in sands. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(2), 307-325.
- Yenginar, Y., & Olgun, M. (2024). Uçucu Kül Katkısının Derin Karıştırma Kolonlarının Sıkışabilirliğine Etkisi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 139-152.
- Zhang, Y., Uchiyama, M., Mori, T., & Nii, K. (2011). Developing GNSS monitoring system for new Japan HANEDA international airport D-runway long-term observation. *24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2011, ION GNSS 2011*,

5, 3790-3795. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861389755&partnerID=40&md5=81192db4866f98b35d85b25cb490ad19>

Zhao, Y., Yang, Z. J., Eibert, D., & Dutta, U. (2024). Permafrost Degradation and Seismic Hazard: Case Study of Northway Airport, Alaska. *Journal of Cold Regions Engineering*, 38(4). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85202606031&doi=10.1061%2fJCRGEI.CRENG-781&partnerID=40&md5=5bfd22a0586fbdda31d0c3ff52ca03d9>