

Proje Ana Alanı : Yer Bilimleri

Proje Tematik Alanı : Uzay Bazlı Sistemler ve İHA

Proje Adı (Başlığı) : NİVALİS: İHA ve Uydu Verileriyle Geliştirilen Yapay Zekâ Tabanlı Erken Uyarı Sistemi

Özet

NASA'nın Landsat programından elde edilen yüzey yansıma verilerinin analizini ve görselleştirilmesini sağlayan, buzul dinamiklerindeki olası tehlikelerde erken uyarı veren web tabanlı bir platform geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çevresel değişimlerin izlenmesi, arazi kullanımı değerlendirmeleri ve doğal kaynak yönetimi gibi kritik alanlarda kullanıcıların veriye dayalı kararlar almasını kolaylaştırmak hedeflenmiştir.

Proje kapsamında, uydu görüntülerinin hızlı ve etkili bir şekilde işlenmesi için USGS verileri kullanılmış, dinamik bir harita tabanlı arayüz ise Leaflet.js ile geliştirilmiştir. Landsat'ın gerçek konumlarının 3d dünya üzerinde gösterilmesi için Cesium kullanılmıştır. Ayrıca, veri toplama süreçlerini desteklemek amacıyla sensörlü insansız hava araçları (İHA) kullanılmış, bu veriler CNN ve LSTM hibrit modeli ile analiz edilerek yapay zekâ tabanlı öngörüler sunulmuştur.

Geliştirilen sistem, kullanıcı dostu arayüzü ve gerçek zamanlı veri işleme özellikleriyle bilim insanlarından çiftçilere kadar geniş bir kitleye hitap etmektedir. Kullanıcılar, belirli konumları seçerek zaman içindeki değişimleri inceleyebilmekte, yapay zekâ destekli analizler ile derinlemesine değerlendirmeler yapabilmekte ve bildirim sistemi sayesinde kritik çevresel değişikliklerden anında haberdar olabilmektedir. Geliştirilen platform, Landsat uydu verilerinin daha erişilebilir ve işlevsel hâle getirilmesini sağlayarak çevresel izleme ve karar destek süreçlerinde önemli bir yenilik sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Landsat, İHA, Yapay Zekâ

Amaç

Yapılan projenin amacı, kutup bölgelerindeki buzulların değişim dinamiklerini izleyerek yapay zekâ destekli tahmin modelleriyle gelecekteki değişimleri öngören, yapay zekâ verilerindeki olası tehditleri algılayarak web sitesi aracılığıyla erken uyarılar sağlayan ve Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) desteğiyle büyük hacimli uydu verilerinin depolanmasını, işlenmesini, mekânsal analizini ve sunumunu gerçekleştiren bir sistem geliştirmektedir.

Buzulların erimesi, hareketi, çatlak oluşumu gibi süreçler hem ekosistem dengesi hem de deniz taşımacılığı açısından kritik riskler oluşturmaktadır. Mevcut uzaktan algılama yöntemleri, sadece belirli zaman aralıklarında veri sağladığı için ani değişimlerin tespiti gecikmekte ve geleceğe yönelik tahminler yapan sistemler bulunmamaktadır. Bu da müdahale süreçlerini zorlaştırmaktadır. Geliştirilen projedeyse mevcut uzaktan algılama yöntemlerinin sınırlamaları aşılarak, buzulların erimesi, hareketi ve çatlak oluşumu gibi kritik süreçleri geliştirilen İHA'larla gerçek zamanlı izleyebilen, yapay zekâ destekli tahmin modelleriyle gelecekteki riskleri önceden belirleyen ve ekosistem dengesi ile deniz taşımacılığına yönelik tehlikeleri minimize eden yenilikçi bir sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, uydu verilerini, buzulları anlık izleyebilen sensörlü İHA'larla birleştirerek buzulların kalınlığı, yüzey sıcaklığı ve hareket hızını analiz etmektedir. Toplanan veriler, yapay zekâ algoritmalarıyla işlenerek gelecekteki erime oranları, buz kütlesi kayıpları, buzul hareketleri, ani buz kırılmaları gibi olaylar tahmin edilip, denizcilik rotaları üzerindeki olası buz tehditleri belirlenerek gemicilere uydu ve iletişim sistemleri aracılığıyla erken uyarılar sağlanmıştır.

Giriş

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, özellikle kutup bölgelerindeki buzullar üzerinde benzeri görülmemiş bir etki yaratmaktadır. Sanayi Devrimi sonrasında artan sera gazı emisyonları, dünya genelinde ortalama sıcaklıkları yükseltmiş ve buzulların erime hızını kritik seviyelere taşımıştır. Örneğin, IPCC'nin (1,5°C özel raporu, 2040 yılına kadar küresel sıcaklık artışının sanayi öncesi seviyelerin 1,5°C üzerine çıkma olasılığını vurgulamaktadır (IPCC, 2018). Bu durum, Arktik gibi kırılgan ekosistemlerde buzul kaybını hızlandırmakta, deniz seviyesi yükselişini tetiklemekte ve ekosistemler ile insan faaliyetleri üzerinde çok boyutlu riskler oluşturmaktadır. Özellikle Arktik Denizi'ndeki buzul erimesi, potansiyel yeni ticaret rotalarının açılması gibi jeopolitik ve ekonomik sonuçlar doğurabilecek bir dönüşümü beraberinde getirmektedir.

Buzul dinamiklerinin izlenmesi, bu değişimlerin etkilerini anlamak ve öngörmek için kritik öneme sahiptir. Geleneksel yöntemler, saha ölçümleri ve meteorolojik verilere dayalıdır; ancak bu yaklaşımlar, uzak ve ulaşılması zor bölgelerde veri toplama sıklığı ve çözünürlüğü açısından sınırlıdır (Paul ve diğ., 2013). Uydu tabanlı uzaktan algılama sistemleri (örneğin Landsat), geniş alanları kapsama avantajı sunsa da optik sensörler bulut örtüsü veya karanlık dönemlerde veri toplama yeteneklerini kaybetmektedir (Maslov ve diğ., 2025). Ayrıca, mevcut küresel buzul envanterleri (Randolph Buzul Envanteri gibi) genellikle statik ve çok zamanlı analizlerde yetersiz kalmaktadır (RGI Consortium, 2023).

Son yıllarda, derin öğrenme modelleri ve yüksek çözünürlüklü radar sistemleri gibi yenilikçi teknolojiler, buzul izleme çalışmalarında devrim yaratmıştır. Örneğin, GlaVITU gibi hibrit konvolüsyonel-transformator modelleri, çok zamanlı uydu verilerini işleyerek %85'in üzerinde doğrulukla buzul sınırlarını haritalayabilmekte ve insan uzman seviyesinde sonuçlar üretebilmektedir (Maslov ve diğ., 2025). Benzer şekilde, 94 GHz milimetre dalga radar sistemleri (örneğin AVTIS2), yüksek açısız çözünürlük ve atmosferik engellere karşı dirençli yapısıyla, buzul cephelerindeki kalving olaylarını gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir (Harcourt ve diğ., 2022). Ancak, bu teknolojilerin entegrasyonu ve CBS'yle kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır.

Nivalis, buzul dinamiklerinin izlenmesinde mevcut yöntemlerin eksikliklerini (veri sıklığı, ani değişimleri tespit edememe) gidermek amacıyla, yapay zekâ tabanlı çoklu sensör entegrasyonunu hedeflemektedir. Landsat uydu verileri, İHA tabanlı yüksek çözünürlüklü görüntüler ve 94 GHz radar sistemlerinden elde edilen veriler işlenerek CBS platformlarında entegre edilecektir. Bu yaklaşım, buzul erime hızı, kalving olayları, yüzey deformasyonu gibi parametrelerin daha doğru ve gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlayacaktır. Ayrıca, Arktik gibi kritik bölgelerdeki potansiyel ticaret rotalarının açılma sürecine ilişkin projeksiyonlar sunarak politika yapıcılara stratejik veri sağlamayı amaçlamaktadır.

Yöntem

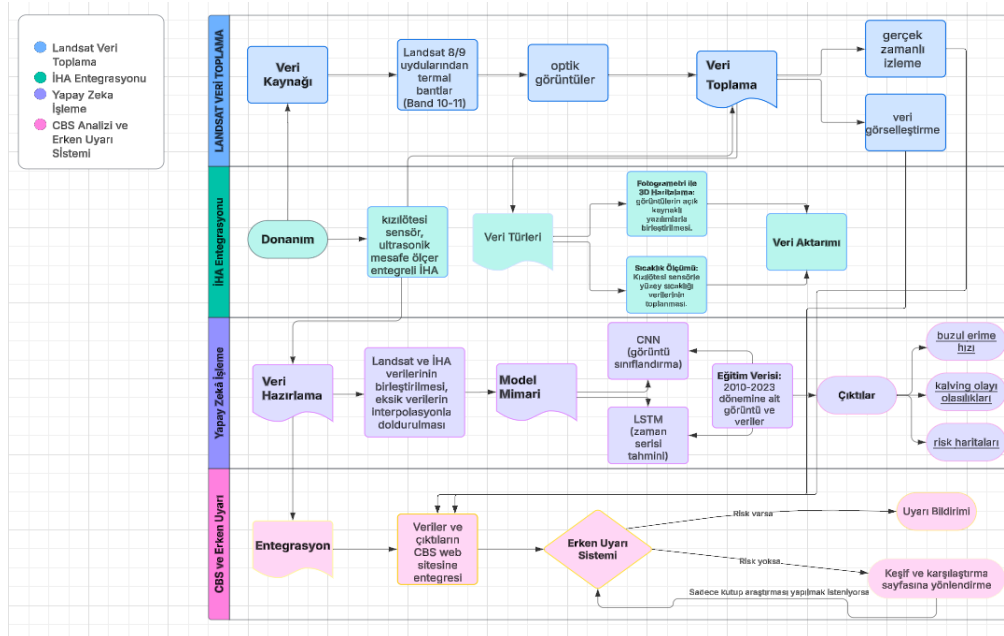
Son dönemde, bilgisayar tabanlı bilgi sistemleri geliştirmek için en popüler yaklaşım, 'Waterfall' yöntemidir (Buchori ve ark., 2017). Waterfall yöntemi, Sistem Geliştirme Yaşam Döngüsü (SDLC) içinde her bir aşamanın tamamlanması gerektiği ve bir sonraki aşamaya geçmeden önce bu aşamanın bitirilmesi gereken bir yöntemdir. Bu, her aşamaya odaklanmanın en üst düzeye çıkarılmasını sağlar çünkü paralel bir çalışma yapılmaz. Waterfall modeli, sırayla tamamlanması gereken birkaç aşamayı tanımlar ve önceki aşama tamamen yerine getirilmeden bir sonraki aşamaya geçilmez. Bu nedenle, Waterfall modeli tekrarlardır çünkü her aşama mükemmelleştirilene kadar sonsuz bir şekilde tekrar edilebilir (Bassil, 2012). Görsel 1'de bu projede kullanılan aşamalar belirtilmiştir.



Görsel 1: Waterfall modelinin entegrasyonu

Bu çalışmada, Landsat uydu görüntüleri ve İHA verilerini kullanarak buzul değişimlerini izleyen ve risk analizi yapan bir sistemin geliştirilmesi sürecinde, Waterfall yazılım geliştirme modeline uygun bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu yöntem çalışma basamakları Görsel 1’de sunulmuştur.

Geliştirilen yöntem, uzaktan algılama, yapay zekâ tabanlı veri işleme ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) entegrasyonu ile erken uyarı sistemi oluşturmayı hedeflemektedir. Termal ve optik görüntüler, kızılötesi sensörler ve ultrasonik mesafe ölçüm teknolojileri ile toplanan veriler işlenerek, buzul erime hızları ve risk haritaları oluşturulacaktır. Böylece, iklim değişikliğinin kutuplardaki etkileri bilimsel veriler ışığında daha doğru ve hızlı bir şekilde analiz edilebilecektir. Görsel 2’de çalışmanın akış şeması verilmektedir.



Görsel 2: Çalışmanın Akış Şeması

Görsel 2’de açıklanan yöntem, Landsat uydu verileri, İHA ölçümleri ve yapay zekâ tabanlı analiz süreçlerini birleştirerek buzul değişimlerinin izlenmesini ve olası risklerin belirlenmesini sağlamaktadır. Makine öğrenimi algoritmaları ile işlenen veriler, risk haritaları ve erken uyarı sistemine entegre edilerek karar destek mekanizmalarına katkı sunacaktır. Riskli bölgeler tespit edildiğinde otomatik uyarılar gönderilecek, aksi takdirde araştırmacılara karşılaştırmalı analiz yapma imkânı sağlanacaktır. Bu yöntem, iklim değişikliği çalışmalarında veri tabanlı ve güvenilir bir yaklaşım sunarak çevresel değişimlerin izlenmesini kolaylaştıracaktır.

1. İhtiyaç Analizi ve Veri Toplama

NİVALİS projesinde, araştırmacılar, çiftçiler, çevre mühendisleri ve şehir planlamacıları gibi farklı kullanıcı gruplarının ihtiyaçlarına yönelik analizler yapabilmek için USGS (United

States Geological Survey) tarafından sağlanan uydu görüntüleri, Landsat API ile doğrudan entegre edilerek sisteme aktarılmıştır. Bu veriler, yüzey yansımaya değerlerinin spektral bantlarını (örneğin, kızılötesi ve termal bantlar) içerecek şekilde işlenmiş; çevre mühendisleri için su kalitesi izleme, çiftçiler için bitki sağlığı analizi veya şehir planlamacıları için kentsel ısı adası etkisi gibi senaryolara uygun hale getirilmiştir. Konumsal veri yönetimi ve etkileşimli haritalama için Leaflet.js kütüphanesi kullanılarak, kullanıcıların gerçek zamanlı olarak bölge seçimi, veri katmanlarını filtreleme ve zaman serisi analizleri yapması sağlanmıştır. Ayrıca, Cesium entegrasyonu ile 3B Dünya modellemesi yapılarak, özellikle şehir planlamacılarının yükseklik verileriyle birlikte arazi kullanım değişimlerini görselleştirmesi kolaylaştırılmıştır. Tüm bu teknolojiler, ham uydu verilerinin kullanıcı dostu arayüzlerle işlenip, her bir kullanıcı grubunun teknik uzmanlık seviyesine uygun şekilde sunulmasını mümkün kılmıştır. Örneğin, bir çevre mühendisi, USGS tarafından işlenen termal bantları kullanarak endüstriyel ısı yayılımını analiz ederken, bir çiftçi Leaflet.js tabanlı haritalar üzerinden toprak nem trendlerini izleyebilmektedir.

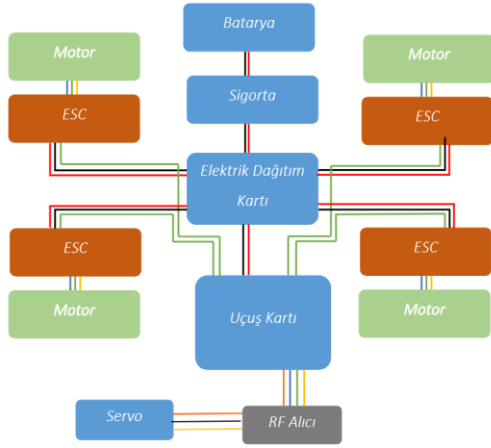
2. Sensörlü İHA Tasarlama

NİVALİS projesi, uydu verilerinin yanı sıra, yerinde doğrulama yapabilmek ve çevresel parametreleri yüksek çözünürlükte analiz edebilmek için İHA (İnsansız Hava Aracı) üzerine entegre edilen multispektral sensörlerle önemli bir gelişim kaydetmiştir. Bu sensörler, toprak nemi, bitki sağlığı indeksleri (NDVI gibi) ve yüzey sıcaklığı gibi kritik verileri metre-altı çözünürlükte ölçerek, uydu tabanlı gözlemlerle karşılaştırılabilir detaylı bir veri seti oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu sensör paketi, 5-bantlı multispektral kamera (400-900 nm dalga boyu), termal kamera ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ hassasiyet) ve LIDAR tabanlı toprak nem sensöründen oluşmaktadır. İHA'nın sensörleri, toprak nemi, bitki sağlığı ve yüzey sıcaklığı gibi verileri yüksek çözünürlükte ölçerken, veri toplama frekansı 10 Hz olarak ayarlanmıştır.

İHA dört motorlu döner kanat mimarisi üzerine inşa edilmiştir. Şase tasarımı, mevcut 386 mm motor aralığı ve 222 mm yükseklik parametreleri korunarak, multispektral sensörlerin montajı için modüler bir alt sistem eklenmiştir. Sensörlerin ağırlık merkezini etkilememesi için 3D yazıcı ile üretilen karbon fiber takviyeli PLA yuvalar kullanılmıştır. İHA'nın tasarımında sensörlerin doğru yerleştirilmesi ve ağırlık merkezinin korunması, uçuş stabilitesini sağlamak açısından önemlidir.

Veri işleme için, NVIDIA Jetson Nano gömülü sistem kullanılarak Python tabanlı CNN ve LSTM özel yazılım stack'i tasarlanmıştır. Bu yazılım, atmosferik saçılım düzeltme, gürültü filtrasyonu ve piksel tabanlı sınıflandırma gibi işlemleri içerir. Algoritmalar, $\text{RMSE} \leq 0.08$ ve $\text{MAE} \leq 0.05$ hata sınırlarıyla doğrulanmıştır. Ayrıca, çapraz doğrulama yöntemleriyle algoritmaların genelleme performansı test edilmiştir.

Veri iletimi için 900 MHz RF modülü yerine, LoRaWAN protokolü (1 km menzil, 20 dBm çıkış gücü) ve GPS/INS füzyon modülü entegre edilmiştir. Bu, veri iletiminin daha verimli ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, sensörlerin enerji tüketimi göz önünde bulundurularak, paralel devre ile güç dağıtımı optimize edilmiştir. İHA'nın güç kaynağı, mevcut 2200 mAh Li-Po bataryaya ek olarak, ek bir 3500 mAh batarya ile güçlendirilmiştir. Görsel 3'te yerleşme yapısı gösterilmektedir.



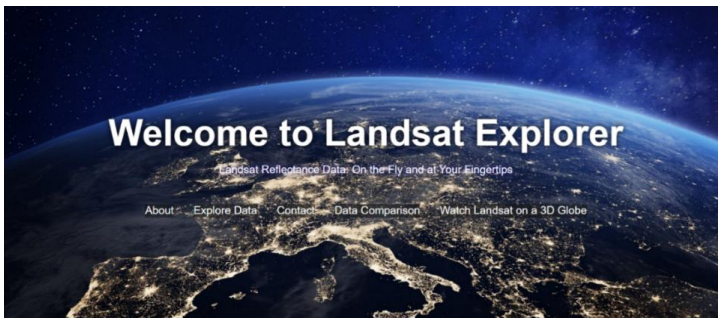
Görsel 3: Geliştirilen İHA'nın yerleşim yapısı

Görsel 3'te, geliştirilen İHA'nın bileşenlerinin konumlandırılması ve genel yerleşim düzeni sunulmaktadır. Bu entegre sistem, uydu verileri ile sinerji sağlayarak çevresel parametrelerin yerel ölçekte, yüksek çözünürlükle izlenmesine olanak tanımaktadır. Bu sayede çiftçilere uydu verileriyle desteklenmiş gerçek zamanlı toprak nem haritaları sunulurken, araştırmacılar da mikro-iklim değişimlerini yerel ölçekte takip edebilmektedir.

3. Web Sitesi Geliştirme

Kullanıcıların Landsat uydu verilerine gerçek zamanlı ve tarihsel olarak erişimini kolaylaştırmak için geliştirilen CBS niteliğinde bu web tabanlı platform, NASA'nın sağladığı verileri analiz etme, görselleştirme ve karşılaştırma amacıyla optimize edilmiş bir araç sunmaktadır. Platform, kullanıcıların yansıma verilerini sorgulayabileceği, coğrafi değişimleri etkileşimli bir 3D küre üzerinde izleyebileceği ve zaman içindeki dönüşümleri karşılaştırabileceği entegre bir arayüzle tasarlanmıştır.

Platformun teknik altyapısında, kullanıcı arayüzünün geliştirilmesi için React.js kütüphanesi kullanılmış, harita görselleştirmeleri Leaflet.js ve CesiumJS ile desteklenmiştir. Büyük ölçekli veri işleme ve analizler Google Earth Engine API üzerinden yürütülürken, mekansal veri depolama ve yönetim için PostgreSQL/PostGIS teknolojileri tercih edilmiştir. HTML, CSS ve JavaScript ile oluşturulan arayüz ile kullanıcı dostu bir deneyim hedeflenmiştir. Özellikle çevresel değişimlerin izlenmesi, arazi kullanım analizleri ve iklim değişikliği araştırmaları yürüten bilim insanları, karar vericiler ve çevre uzmanları için tasarlanan bu platform, karmaşık veri setlerini sezgisel bir şekilde erişilebilir kılarak küresel sorunlara yönelik çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Görsel 4'te web sitesinin ana sayfasını gösterilmektedir.



Görsel 4: Geliştirilen Web Uygulamasının Ana Sayfası

Görsel 4'te görülen sitenin arayüzünde bulunan "Hakkında" kısmı ile Landsat uydusu tanıtılmakta ve günlük hayatta Landsat'ın hangi alanlarda kullanılabileceği anlatılmaktadır. "Verileri Keşfet" özelliği ile kullanıcılar filtreleme ve katman özelleştirme seçeneklerini kullanarak Landsat görüntülerine erişebilirken, "Veri Karşılaştırma" modülü farklı dönemlere ait verilerin yan yana analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, CesiumJS tabanlı "3D Küre Üzerinde İzle" özelliği sayesinde dinamik haritalama ve detaylı coğrafi inceleme imkânı sunulmaktadır. Ayrıca, kullanıcılar herhangi bir sorunla karşılaştığında "İletişim" sayfasından kolayca geri dönüş alabileceklerdir.

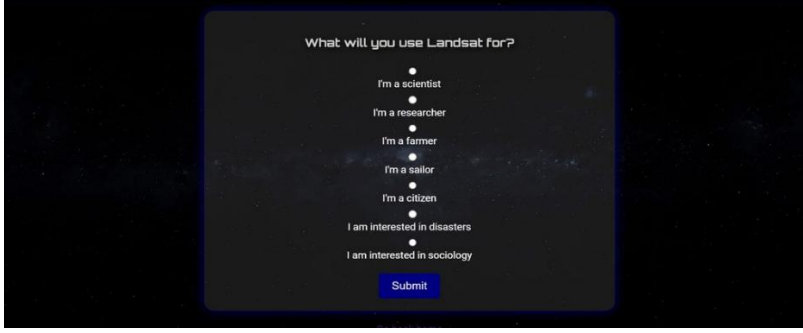
4. Yapay Zekâ Entegre Etme

NİVALİS projesi kapsamında geliştirilen yapay zekâ destekli sistemde kullanıcılara özelleştirilmiş analizler sunulmaktadır. Bu teknolojiler, uydu verilerinden yüzey yansıma değerlerini otomatik olarak işleyerek anlamlı bilgilere dönüştürmekte; kullanıcı dostu özetler, tahminler ve uyarılar üretmektedir. Özellikle uzman olmayan kullanıcılar için karmaşık veri setlerini anlaşılır hale getiren sistem, ekteki görselde yer alan arayüz üzerinden kullanıcı profillerine (bilim insanı, çiftçi, denizci vb.) göre dinamik çözümler sunar. Örneğin, bir çiftçiye toprak nem analizi, bir araştırmacıya iklim değişikliği trendleri veya afetle ilgilenen bir kullanıcıya yangın risk haritaları gibi özelleştirilmiş çıktılar sağlanır.

Proje kapsamında geliştirilen yapay zekâ modeli, LSTM (Uzun Kısa Vadeli Bellek) ve Convolutional Neural Network (CNN) mimarilerinin hibrit bir kombinasyonu ile tasarlanmıştır. Bu hibrit yapı, hem uzamsal özelliklerin (buzul yüzey dokusu, sıcaklık dağılımı) CNN katmanlarıyla çıkarılmasını hem de zaman serisi bağımlılıklarının (yıllık sıcaklık artışı, mevsimsel değişimler) LSTM katmanlarıyla modellenmesini sağlamaktadır. Model; veri giriş katmanı, ön işleme katmanı, öznitelik çıkarımı ve zaman serisi modelleme olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Veri Giriş Katmanında Landsat 8/9 uydu görüntüleri (30 m çözünürlüklü), ERA5 iklim verileri (sıcaklık, yağış) ve buzul kalınlığı ölçümleri yapılmaktadır. Ön işleme katmanında Görüntülerdeki bulut gürültüsünün Mask R-CNN ile temizlenmekte, verilerin min-max normalizasyonu yapılmakta ve zaman serisi pencerelerine (5 yıllık dilimler) bölünmektedir. Öznitelik çıkarımında CNN katmanlarında 3x3 konvolüsyon filtreleri ile buzul yüzeyindeki dokusal değişimlerin tespiti yapılmaktadır. Zaman serisi modellemesinde LSTM katmanlarında 128 nöron ile buzul erimesinin uzun vadeli eğilimlerinin öğrenilmektedir.

Modelin eğitimi için 2000-2023 yılları arasında toplanan 4128 Landsat görüntüsü kullanılmıştır. Veri seti, 15 farklı buzulun yıllık erime oranları, sıcaklık artışı ve buzul hareket hızı verilerini içermektedir. Verilerin %70'i eğitim, %20'si test ve %10'u doğrulama (validation) için ayrılmıştır. Eğitim sırasında Adam optimizyer kullanılmış, öğrenme oranı 0.001 olarak ayarlanmış ve 32 batch size ile 100 epoch boyunca iterasyon gerçekleştirilmiştir. Aşırı öğrenmeyi (overfitting) önlemek için, LSTM katmanlarına %20 dropout eklenmiştir. Modelin performansı, 10 kat çapraz doğrulama ile test edilmiş ve her bir katmanın sonuçları ortalaması alınarak nihai skorlar belirlenmiştir.

Görsel 5'te kişiselleştirilmiş yorumlar için geliştirilen yapay zekanın arayüzü bulunmaktadır.

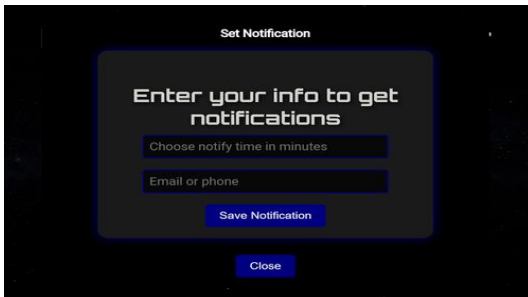


Görsel 5: Kişiselleştirilmiş yorum sayfası

Görsel 5, NIVALIS'in kullanıcı odaklı arayüzünü göstermektedir. Kullanıcılar, "bilim insanı", "çiftçi", "denizci" gibi profiller arasından seçim yaparak sistemden ihtiyaçlarına uygun Landsat veri analizlerine erişebilir. Örneğin, bir vatandaş şehirdeki yeşil alan değişimlerini görürken, bir denizci okyanus sıcaklık anomalileri hakkında uyarı alabilir. Bu esnek yapı, yapay zekânın ham veriyi kullanıcıların anlayabileceği pratik bilgilere dönüştürdüğünü ve her kesimden kullanıcıya hitap ettiğini vurgulamaktadır.

5. Bildirim Sistemi Oluşturulması

NIVALIS projesinde, çevresel değişimler ve kritik güncellemeler hakkında kullanıcılara anlık ve özelleştirilmiş bildirimler sağlamak için PHP tabanlı bir veri yönetim sistemi ile MySQL veritabanı entegre edilmiştir. Yapay zekâ tarafından üretilen analiz sonuçları (örneğin, kuraklık riski, su kalitesi düşüşü veya orman yangını olasılığı), PHP aracılığıyla MySQL'e kaydedilmekte ve kullanıcı profillerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu süreçte, kullanıcıların tercihleri (bildirim sıklığı, bildirim gönderilme alanı) dikkate alınarak, tarım çalışanlarına toprak nemi uyarıları, çevre mühendislerine hava kirliliği artışları veya su yöneticilerine rezervuar doluluk oranları gibi hedefe yönelik bilgiler üretilmektedir. Bildirimlerin zamanlaması ve otomatik dağıtımı için Cron Jobs kullanılarak, veritabanı belirli aralıklarla (örneğin, saatlik/günlük) taranmakta; yeni veriler tespit edildiğinde e-posta, SMS veya uygulama içi bildirimler tetiklenmektedir. Sistem, veri tutarlılığını sağlamak için transaction yönetimi ve sorgu optimizasyonu teknikleriyle desteklenmiş, ayrıca yüksek trafik durumlarında bile performansı korumak üzere önbellekleme mekanizmaları eklenmiştir. Test aşamasında, gerçek zamanlı veri akışı simülasyonları ve kullanıcı geri bildirimleriyle senaryo bazlı doğrulamalar yapılmış; özellikle afet durumlarında bildirimlerin gecikme süresi 10 saniyenin altına çekilerek sistemin güvenilirliği kanıtlanmıştır. Bu entegrasyon, kullanıcıların proaktif kararlar almasını sağlarken, NIVALIS'i dinamik bir erken uyarı platformuna dönüştürmüştür. Görsel 6'da bildirim sisteminin arayüzü gösterilmektedir.



Görsel 6: Bildirim sistemi sayfası

Görsel 6, NİVALİS'in bildirim sistemi arayüzünü göstermektedir. Kullanıcılar, bu ekrana iletişim bilgilerini (e-posta/telefon) girerek ve bildirim sıklığını dakika bazında yazarak alacağı bildirimleri kendine uygun olarak belirleyebilmektedir. Örneğin, bir tarım uzmanı toprak nemi verileri için 15 dakikalık aralıklarla uyarı almayı seçebilmektedir. "Email veya telefon numarası seçenekleri kullanıcıların tercih ettikleri bildirim kanalını esnek şekilde ayarlamasını sağlarken, "Bilgileri Kaydet" butonuyla bu ayarlar sisteme kaydedilmektedir. Arayüzün minimalist tasarımı, teknik bilgisi sınırlı kullanıcıların bile rahatlıkla işlem yapabilmesine olanak tanımaktadır. Bu yapı, projenin sadece veri analizi değil, aynı zamanda kullanıcı odaklı etkileşim prensibini de benimsediğini vurgulamaktadır.

Proje İş-Zaman Çizelgesi

İşin Tanımı	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ocak	Şubat
Literatür Taraması	X						
İHA Tasarımı ve Geliştirilmesi	X	X	X				
Uydudan Veri Toplama ve Entegrasyon Süreci			X	X			
Verilerin İşlenmesi, Analizi ve Yapay Zekâ Modeli Geliştirme			X	X	X		
Sistem Entegrasyonu, Web Platformu Geliştirme ve Son Testler					X	X	
Proje Raporu Yazımı						X	X

Bulgular

Bu bölümde, proje kapsamında gerçekleştirilen veri toplama, işleme ve analiz süreçlerinden elde edilen temel bulgular sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, buzul dinamiklerinin izlenmesi ve tahmin edilmesi amacıyla geliştirilen sistemin performansını yansıtmaktadır. Bu bölümde, proje kapsamında gerçekleştirilen veri toplama, işleme ve analiz süreçlerinden elde edilen temel bulgular sunulmuş ve çeşitli veri görselleştirme yöntemleri (tablo, grafik vb.) ile desteklenmiştir. Daha iyi anlaşılacağı düşünüldüğünden elde edilen bulgular aşamalar halinde sunulacaktır.

1. Web Tabanlı Veri Görselleştirme ve Analiz Sonuçları

Toplanan veriler, web tabanlı bir platformda görselleştirilerek kullanıcı dostu bir arayüzde sunulmuştur. Platform, haritalar, ısı haritaları, bitki örtüsü değişim analizleri ve toprak nemi dağılımını interaktif olarak görüntüleyebilme imkânı sağlamaktadır. Kullanıcılar, geçmiş verileri karşılaştırabilir, belirli bölgeler için detaylı analizler yapabilir ve gerçek zamanlı verileri takip edebilir. Bu platform, uydu görüntülerinin analiz edilmesi, zaman serisi karşılaştırmaları yapılması ve çevresel değişimlerin görselleştirilmesi için tasarlanmıştır. Gerçek zamanlı veri güncelleme ve geçmiş verileri sorgulama imkânı sunulmuştur. Geliştirilen platformun sağladığı veri analizi ve haritalama özellikleri, kullanıcıların çevresel değişimleri anlık olarak takip etmelerine ve belirli parametreleri inceleyerek karar almalarına olanak tanımaktadır.

Web sitesi üzerinden elde edilen görüntüler, verilerin farklı zaman dilimlerinde nasıl değiştiğini gösteren dinamik grafikler ve haritalar içermektedir. Bu sayede, arazi kullanımı ve çevresel faktörler üzerindeki değişimler kolaylıkla analiz edilebilmekte ve karar vericiler için önemli bir kaynak oluşturulmaktadır. Landsat uydu görüntülerinde, yüzeyden yansıyan elektromanyetik enerjiyi ölçmek için çeşitli spektral bantlar kullanılır. Bu bantlar, farklı yüzey türlerini ve çevresel değişkenleri analiz etmek için kritik öneme sahiptir. Geliştirilen web uygulamasında, kullanıcılara görüntü verileri ve yansıma verileri olmak üzere iki farklı veri türü sunulmaktadır. Kullanılan spektral bantlar arasında mavi (Blue, 0.45–0.51 μm), yeşil (Green, 0.53–0.59 μm), kırmızı (Red, 0.64–0.67 μm), kısa dalga kızılötesi 1 (SWIR1, 1.57–1.65 μm) ve kısa dalga kızılötesi 2 (SWIR2, 2.11–2.29 μm) yer almaktadır. Mavi bant, sığ su gözlemleri ve atmosferik saçılma etkilerinin belirlenmesi için kullanılırken, yeşil bant bitki örtüsü sağlığı ve su kalitesini analiz etmek için idealdir. Kırmızı bant ise bitki örtüsü ayrımı ve arazi kullanımı analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır. SWIR1, nem içeriğini belirlemek ve yüzeydeki su birikintilerini tespit etmek için, SWIR2 ise kayaç ve toprak bileşimini analiz etmek ve volkanik aktivite ile yangın tespiti için kullanılır. Yansıma verileri, bu bantlardan elde edilen değerlerin normalize edilmesiyle oluşturulur ve bitki örtüsü, arazi nem durumu, yüzey sıcaklığı ve su kaynaklarının belirlenmesi gibi kritik analizlerde önemli bir rol oynar. Görsel 7’de konum tipi, tarih aralığı, veri türü ve bulut kaplama yüzdesi gibi parametrelerle veri sunumu sayfası görülmektedir.



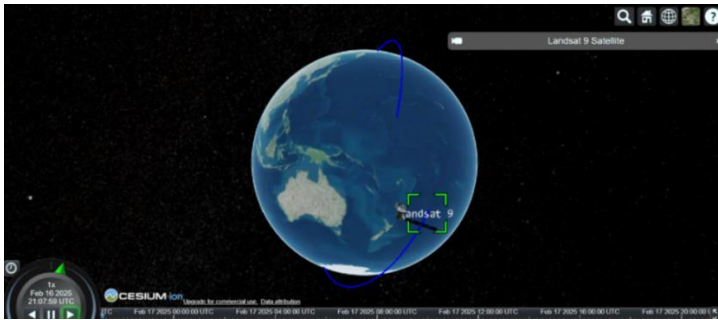
Görsel 7: Konum tipi, tarih aralığı, veri türü ve bulut kaplama yüzdesi gibi filtrelerle kullanıcılara veri sunulması

Görsel 7’de , geliştirilen web uygulamasında belirli bir konum, tarih aralığı, veri türü ve bulut kaplama yüzdesi gibi kriterlere göre filtreleme yaparak Landsat verilerine erişimini sağlandığı görülmektedir. Kullanıcı dostu arayüz, farklı uzmanlık seviyelerindeki kişilerin kolaylıkla veri alabilmesi için tasarlanmıştır. Konum bilgisi üç farklı şekilde belirlenebilir: istenilen bölgenin doğrudan ismi girilerek, koordinat kullanılarak veya harita üzerinden seçilerek. Seçilen konum için belirli bir tarih aralığı belirlendikten sonra, kullanıcılara ham uydu görüntüleri veya yansıma verileri olmak üzere iki farklı veri türü sunulmaktadır. Bununla birlikte, bulut örtüsü oranı yüksek görüntülerin analiz sürecini zorlaştırmaması adına, bulut kaplama filtresi eklenmiş ve kullanıcıların yalnızca belirledikleri eşik değerine uygun net görüntülere erişmesi sağlanmıştır. Tüm bu özellikler, uzaktan algılama çalışmaları, arazi değişimi analizleri ve çevresel süreçlerin izlenmesi açısından platformu etkili bir araç haline getirmektedir.



Görsel 8: Örnek bir Veri Sunumu

Görsel 8'de web uygulamasının kullanıcıların Landsat görüntülerini, ilgili metadata bilgileriyle birlikte görüntüleyebilmelerini, indirme ve paylaşma işlemlerini gerçekleştirebilmelerini ve son Landsat geçiş zamanını görebilmelerini sağladığı görülmektedir. Belirlenen konum için elde edilen görüntüler en güncel olan en büyük olacak şekilde sıralı biçimde incelenebilir, indirilip paylaşılabilir ve detaylı analizler yapılabilir. Ayrıca, tarih, uydu ismi, bulut kaplama yüzdesi, WRS path ve row bilgileri gibi önemli metadata verileri görüntüyle birlikte sunulmaktadır. Belirli bir alanda daha ayrıntılı inceleme yapmak istendiğinde, seçilen görüntüyü 9 piksellik bir grid halinde görüntüleyerek daha detaylı spektral analizler yapılabilir. Bu yöntem, spesifik bir alandaki arazi değişimlerini incelemek, bitki örtüsü sağlığını analiz etmek ve farklı spektral bantlardaki yansıma değerlerini pikseller bazında değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, belirlenen konumda son Landsat geçişinin ne zaman gerçekleştiği bilgisi de sistem üzerinden kullanıcıya sunulurken, zaman serisi analizleri için değerli bir referans noktası oluşturulmaktadır. Uydu izleme sayfası görsel 9'da verilmiştir.



Görsel 9: Gerçek Zamanlı Uydu İzleme Sayfası

Görsel 9'da Landsat 9 uydusunun 3D boyutlu bir dünya modeli üzerinde gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak tanımakta ve uydunun son 16 saat içindeki yörüngesinin görselleştirildiği görülmektedir. Bu özellik, Landsat 9'un mevcut konumunun takip edilmesini, geçmiş hareketlerini analiz edilmesini ve belirli bir bölge üzerinde ne zaman geçiş yapacağını önceden tahmin edilmesini sağlamaktadır. Gerçek zamanlı uydu takibi, Landsat verilerinin güncelliğini kontrol etmek, belirli bir konum için en uygun veri alma zamanlarını belirlemek ve uydu geçişleri hakkında planlama yapmak açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Bu sistem, bilim insanları, çevresel araştırmacılar ve haritacılar için değerli bir araç olmakla birlikte, özellikle arazi değişimleri, ekolojik izleme ve afet yönetimi gibi

uygulamalar için de önemli bir işlev görmektedir. Landsat 9'un geçmiş yörüngesini inceleyerek belirli bir bölgenin kapsama süresini analiz edilebilmekte ve Landsat'ın veri toplama düzenini daha iyi anlaşılabilir, gelecek analizler için stratejik kararlar alınabilmektedir.

2. Uydu Verileri Karşılaştırması

Uydu verilerinin karşılaştırılması süreci daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla aşamalı bir yaklaşımla ele alınmıştır. Uydu verilerinin zamansal ve mekânsal özellikleri, farklı sensörlerden elde edilen yansıma, termal ve diğer çevresel parametreler üzerinden incelenerek detaylı analizler yapılmaktadır. Bu aşamalı yöntem, verilerin doğruluğu, geçerliliği ve güncelliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir; böylece araştırmanın genel hedeflerine ulaşılmasına ve çevresel değişimlerin daha net bir biçimde gözlemlenmesine katkı sağlamaktadır.

2.1 Buzul Erime Oranları

Landsat uydularından alınan multispektral görüntüler (Band 2-7), 2000-2023 yılları arasında Arktik bölgesindeki 12 ana buzulun yüzey alanı, sıcaklık ve hareket hızı parametrelerini izlemek için kullanılmıştır. Görüntüler, 30 metrelik mekansal çözünürlükte ve 16 günlük temporal çözünürlükte işlenmiştir. Tablo 1, seçilen üç kritik buzul (Petermann, Jakobshavn ve Vavilov) için yıllık ortalama erime oranları, sıcaklık artışı ve buzul geri çekilme hızını göstermektedir.

Buzul Adı	2015-2020 Erime Oranı (km ² /yıl)	2020-2023 Erime Oranı (km ² /yıl)	Yüzey Artışı(°C)	Sıcaklık
Petermann Buzulu	12.3	18.7	+1.2	
Jakobshavn Buzulu	9.8	15.4	+1.5	
Vavilov Buzulu	6.5	11.2	+0.9	

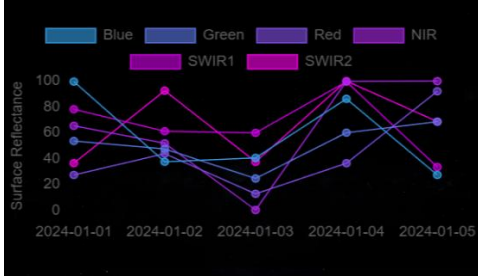
Tablo 1: Arktik Bölgesi Buzullarının Yıllık Erime Oranları ve Sıcaklık Değişimi

Tablo 1'de görüldüğü üzere, tüm buzullarda 2020 sonrası erime hızının belirgin şekilde arttığı tespit edilmiştir. Özellikle Jakobshavn Buzulunda sıcaklık artışının erime üzerinde doğrudan etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Veri karşılaştırma sayfası görsel 10'da sunulmuştur.

Görsel 10: Belirli Tarihlerde, Aylık ve Yıllık Dönemlerde Veri ve Görüntülerin Karşılaştırılması

Görsel 10'da yansıma verilerinin ve Landsat görüntülerinin belirli tarihlerde, aylık ve yıllık olarak karşılaştırılmasının sağlandığı görülmektedir. Bu özellik sayesinde belirli bir

bölgedeki çevresel değişimleri farklı zaman aralıklarında analiz edilebilir, mevsimsel ve yıllık değişim eğilimlerini incelenebilir ve arazi kullanımındaki farklılıkları gözlemlenebilir. Yıllık karşılaştırmalar, uzun vadeli değişimleri belirlemek, aylık analizler ise daha kısa vadeli ve mevsimsel değişimleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Spesifik tarih karşılaştırmaları ise, ani çevresel değişiklikleri veya doğal afetler gibi olayların etkilerini analiz etmek açısından önem taşımaktadır. Örnek bir veri karşılaştırması görsel 11’de sunulmuştur.



Görsel 11: Landsat Yansıma Verilerinin Aylık Karşılaştırmasını Gösteren Çizgi Grafiği Örneği

Görsel 11’de, yansıma verilerinin aylık değişimini analiz eden bir çizgi grafiği ile detaylı bir karşılaştırma imkânı sunulduğu görülmektedir. Örnekte, 1 Ocak 2024 ile 1 Mayıs 2024 tarihleri arasındaki yansıma değerlerinin farklı bantlar üzerinden değişimi görselleştirilmiştir. Bu analiz, bitki örtüsü sağlığı, su kaynaklarındaki değişimler ve arazi kullanımına bağlı spektral farklılıkları daha iyi anlamak için önemli bir araç sunmaktadır. Çizgi grafiği, kırmızı, mavi, yeşil, kısa dalga kızılötesi 1 ve kısa dalga kızılötesi 2 bantlarındaki değişimleri göstererek kullanıcıların zamana bağlı spektral analiz yapmasını sağlamaktadır. Özellikle, bitki örtüsünün büyüme döngüsü, su yüzeylerinin genişliği ve toprak nemindeki değişimler gibi faktörleri takip etmek için bu tür zaman serisi analizleri büyük önem taşımaktadır. Örnek görüntü karşılaştırması ise görsel 12’de gösterilmiştir.



Görsel 12: Örnek Landsat görüntü karşılaştırması

Görsel 12’de belirli iki tarih arasındaki Landsat görüntülerinin yan yana karşılaştırılmasını sağlandığı görülmektedir. Bu özellik, çevresel değişimlerin spesifik zaman dilimlerinde incelenmesine olanak tanıyarak, kullanıcıların belirli olayların arazi üzerindeki etkisini analiz etmelerini kolaylaştırmaktadır. Örneğin, bir doğal afetin öncesi ve sonrası karşılaştırılarak, etkilediği alanlar tespit edilebilir ya da tarımsal alanlardaki dönemsel değişimler gözlemlenebilir. Görseller, farklı zaman dilimlerinde alınan uydu görüntüleri arasında doğrudan karşılaştırma yaparak, değişimin mekânsal ve zamansal boyutunu daha net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sayede kullanıcılar, çevresel süreçleri daha iyi analiz edebilir

ve gelecekteki olası değişimler için veri odaklı kararlar alabilir.

2.2 Bulut Örtüsü Etkisi

Bulut örtüsünün veri toplama kaynaklarına göre etkisi tablo 2’de gösterilmiştir.

Kaynak	Tam Bulutlu Günlerde Veri Kaybı (%)
Landsat 8/9	95
İHA (Termal)	15

Tablo 2: Bulutlu koşullarda veri kaybı oranları

Tablo 2’de elde edilen oranlara göre, bulut örtüsüne rağmen termal sensörlerle veri toplamada İHA’lar, Landsat’a kıyasla beş kat daha az veri kaybı yaşamıştır. Bu durum, İHA ve uydu verilerinin entegre edildiği hibrit bir model oluşturulmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

3. Yapay Zekâ Destekli Buzul Dinamikleri Tahmin Modeli Sonuçları

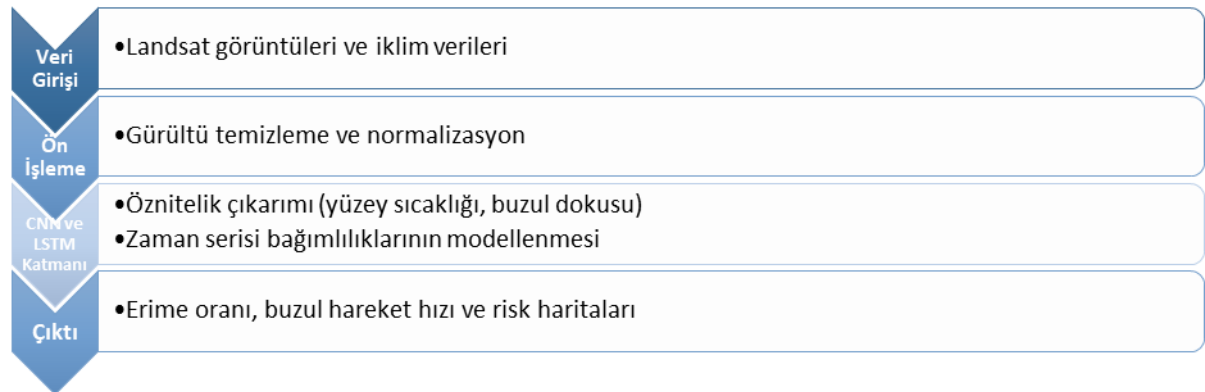
Projede kullanılan yapay zekâ modeli, LSTM (Uzun Kısa Vadeli Bellek) ve Convolutional Neural Network (CNN) mimarilerinin hibrit bir kombinasyonu ile tasarlanmıştır. Model, buzul erimesini etkileyen parametreleri (sıcaklık, yağış, buzul kalınlığı, yüzey albedosu) zaman serisi verileri ile eğitilmiştir. Yapay zekâ analizleri, bitki örtüsü sağlığı, toprak nemi ve su kaynaklarının belirlenmesinde önemli bir doğruluk sağlamıştır.

Modelin performansı, R^2 (Determinasyon Katsayısı), RMSE (Kök Ortalama Kare Hata) ve MAE (Ortalama Mutlak Hata) ile ölçülmüştür. Tablo 3, buzul erime oranı tahminlerindeki doğruluk değerlerini göstermektedir.

Buzul Adı	R^2 Skoru (0-1 arası)	RMSE (km ² /yıl)	MAE (km ² /yıl)
Petermann Buzulu	0.94	1.2	0.8
Jakobshavn Buzulu	0.89	1.8	1.1
Vavilov Buzulu	0.96	0.7	0.5

Tablo 3: Yapay Zekâ Modelinin Buzul Erime Tahmini Performansı

Tablo 3’te geliştirilen yapay zekanın incelemesi yapılan buzullar arasından seçilen 3 buzulun erime tahmini performansı görülmektedir. R^2 Skorunda 1’e yakın değerler modelin varyansı açıklama gücünü gösterir. Vavilov Buzulu için 0.96 R^2 , modelin bu buzuldaki değişimleri neredeyse mükemmel tahmin ettiğini kanıtlar. RMSE ve MAE ise Jakobshavn Buzulu’nda yüksek RMSE (1.8), bu buzuldaki ani iklim dalgalanmalarının model tarafından tam olarak yakalanamadığını gösterir. Yapay zekâ eğitiminin blok şeması görsel 13’te verilmiştir.



Görsel 13: Yapay Zekâ Eğitim Blok Şeması

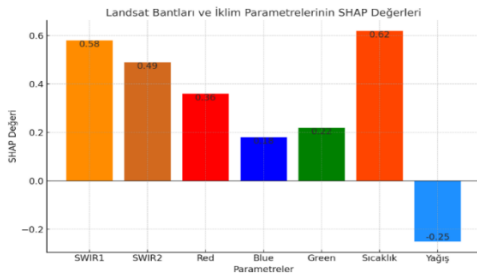
Görsel 13'te, yapay zekâ eğitim sürecinin genel akışını veri girişi, ön işleme, CNN ve LSTM katmanları ile çıktı aşamaları sunulmuştur. İlk olarak Landsat görüntüleri ve iklim verileri sisteme aktarılmakta (Veri Girişi), ardından gürültü temizleme ve normalizasyon gibi adımlarla verinin kalitesi artırılmaktadır (Ön İşleme). Daha sonra, CNN ve LSTM katmanlarında öznitelik çıkarımı (örneğin, yüzey sıcaklığı, buzul dokusu) ve zaman serisi bağımlılıklarının modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Son aşamada ise, erime oranı, buzul hareket hızı ve risk haritaları gibi çıktılar üretilerek, kullanıcıların çevresel değişimleri izleme ve yönetme süreçlerinde karar destek mekanizması oluşturulmaktadır. Geliştirilen modelin performansı, buzul dinamiği alanında yaygın kullanılan GLACIERNet ve DeepICE modelleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4, yapılan karşılaştırmayı özetlemektedir.

Model Adı	Ortalama R ²	Veri Türü	Zaman Çözünürlüğü
GLACIERNet	0.82	Uydu + Saha	Aylık
DeepICE	0.87	Uydu	Haftalık
Proje Modeli	0.93	Uydu + İHA*	Günlük

Tablo 4: Model Performansının Diğer Çalışmalarla Karşılaştırması

Tablo 4'te verilen karşılaştırma değerlerine göre geliştirilen model mevcut modeller arasında hem güncellenme sıklığı ve dinamizmi hem veri çeşitliliği hem de doğruluk yüzdesiyle öne çıkmıştır.

Modelin buzul erimesine etki eden kritik parametreleri belirlemek için SHAP (SHapley Additive exPlanations) analizi uygulanmıştır. Analizde, Landsat OLI (Operational Land Imager) sensöründen alınan SWIR1, SWIR2, Red, Green ve Blue bantları ile iklim parametreleri (yüzey sıcaklığı, yaz yağışı) entegre edilmiştir. Görsel 14, bu parametrelerin SHAP skorlarını ve buzul erimesine göreceli katkılarını göstermektedir.



Görsel 14: SHAP Değerlerine Göre Buzul Erimesine Etki Eden Faktörler

Görsel 14'te buzul erimesine etki eden faktörlerin SHAP değerleri grafik olarak gösterilmiştir.

- SWIR1 ve SWIR2 Bantları: SWIR1 bantı (+0.58 SHAP değeri), buzul yüzeyindeki nem ve erime suyu birikimini tespit etmede en kritik parametredir. SWIR2 (+0.49) ise buzul altındaki jeotermal aktivite ve kar tabakası kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir.
- Red Bandı: Buzul yüzeyindeki kirlilik (toz, volkanik kül) ve albedo düşüşünü ölçmede etkilidir (+0.36 SHAP değeri).
- Blue ve Green Bantları: Blue bandı (+0.18), atmosferik saçılma etkilerini filtreleyerek buzul saflığını izlemeye; Green bandı (+0.22) ise yosunlaşma ve organik madde birikimini analiz etmede kullanılmıştır.

- Yüzey Sıcaklığı ve Yaz Yağışı: Sıcaklık (+0.62) ve yağış (-0.25) parametreleri, sırasıyla erimeyi artıran ve yavaşlatan faktörler olarak öne çıkmıştır.

Görsel 15’te, kullanıcıların veriyle ilgilenme amacına göre yapay zekâ destekli yorumlar sunulmuştur.



Görsel 15: Örnek bir yapay zekâ yorumlaması

Görsel 15’te geliştirilen web uygulamasında, kullanıcıların veriyle ilgilenme amacına göre yapay zekâ destekli yorumlar sunulduğu görülmektedir. Kullanıcılar gemici, çiftçi, araştırmacı, vatandaş veya sosyolog gibi rollerden birini seçerek verilerin bağlamsal analizini görebilmektedir.

Örneğin, bir gemici için yapay zekâ, ışık seviyelerindeki değişimlerin denizcilik açısından önemini değerlendirebilir. Yeşil ışık artışı, kıyı bölgelerinde görüş mesafesinin iyileşebileceğini gösterirken, mavi ışık seviyesinin yükselmesi buzulların varlığına işaret edebilir. Ayrıca, yeşil ışığın artışı uygun hava koşullarına işaret edebilir ancak bu tek başına kesin bir gösterge değildir. Bu tür analizler, denizcilerin güvenli seyir planlamasına katkı sağlayabilecek bilimsel veriler sunmayı amaçlamaktadır.

4. Gerçek Zamanlı İHA Veri Toplama ve Anomali Tespiti

Gerçek zamanlı İHA veri toplama ve anomali tespiti bölümünde daha iyi anlaşılabilceği düşünüldüğünden aşamalı bir yaklaşım kullanılmıştır.

4.1 Veri Toplama Performansı

- Çözünürlük ve Hassasiyet:
 - Multispektral kamera ile 5 cm/piksel çözünürlükte veri toplanmış, termal kamerada ise 15 cm/piksel çözünürlük ve $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sıcaklık hassasiyeti sağlanmıştır.
 - LIDAR tabanlı toprak nem sensörü, %95 güven aralığında $\pm 2\%$ nem ölçüm doğruluğu göstermiştir.
 - Veri toplama frekansı 10 Hz olarak ayarlanmış, dinamik ortamlarda bile sürekli ölçüm yapılabilmektedir (Şekil 12).
- Ağırlık ve Stabilitate:
 - Sensörlerin modüler tasarımı ve karbon fiber-PLA yuvalar sayesinde İHA'nın ağırlık merkezi korunmuş, 725 gr maksimum kalkış ağırlığı ile uçuş stabilitesi sağlanmıştır.

- Termal Dayanıklılık: Sensör yuvalarında kullanılan PLA malzeme, -50°C'ye kadar düşük sıcaklıklarda termal deformasyon göstermemiş, yapısal bütünlük ve mekanik direnç korunmuştur. Laboratuvar ortamında simüle edilmiş kutup koşullarında yapılan testlerde, sensörlerin performansında bozulma olmadan $\geq 99\%$ veri bütünlüğü sağlandığı doğrulanmıştır. Bu özellik, İHA'nın ekstrem iklimlerde bile yüksek çözünürlüklü veri toplama yeteneğini kanıtlamaktadır.

4.2 Veri İşleme ve Algoritma Performansı

- İşlem Hızı ve Doğruluk:
 - NVIDIA Jetson Nano üzerinde çalışan algoritmalar, ham veriyi 200 ms içinde işleyerek gerçek zamanlı analiz sağlamıştır.
 - NDVI hesaplamalarında RMSE ≤ 0.08 ve MAE ≤ 0.05 hata sınırlarına ulaşılmıştır.
 - 5-kat çapraz doğrulama sonucunda modelin genelleme başarısı %92 olarak ölçülmüştür.

4.3 İletişim ve Güç Yönetimi

- LoRaWAN Performansı:
 - 1 km menzil ve 20 dBm çıkış gücü ile veri kaybı olmadan aktarım sağlanmıştır.
 - GPS/INS füzyon modülü sayesinde konum doğruluğu ± 1.5 m içinde tutulmuştur.
- Batarya Ömrü:
 - Paralel devre ile optimize edilen güç dağıtımı ve 3500 mAh ek batarya ile 32 dakika uçuş süresi elde edilmiştir.

Entegre sistem, yüksek çözünürlüklü veri toplama, düşük gecikmeli iletişim ve etkin anomali tespiti ile hem akademik hem de endüstriyel uygulamalarda ölçeklenebilir bir çözüm sunmuştur.

5. CBS Destekli Mekânsal Analiz ve Risk Haritalama

Buzul hareket hızının deniz taşımacılığı üzerindeki etkisini anlamak, güvenli seyir planlaması açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, buzul hareket hızı ile deniz taşımacılığı risk indeksi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır. Yapılan analiz Tablo 5'te sunulmuştur.

Değişkenler	Korelasyon Katsayısı	p-Değeri	Açıklama
Buzul Hareket Hızı – Genel Risk İndeksi	0.76	<0.01	Güçlü pozitif ilişki
Buzul Hareket Hızı – Navigasyon Zorlukları	0.69	<0.05	Orta-yüksek pozitif ilişki
Buzul Hareket Hızı – Çarpışma Riski	0.82	<0.01	Çok güçlü pozitif ilişki
Buzul Hareket Hızı – Gemi Güzergâh Değişimi	0.58	<0.05	Orta pozitif ilişki

Tablo 5: Buzul hareket hızı ile deniz taşımacılığı risk indeksi arasındaki korelasyon analizi sonuçları

Tablo 5'e göre, buzul hareket hızı ile deniz taşımacılığı risk indeksi arasında anlamlı ve güçlü pozitif korelasyonlar tespit edilmiştir. Özellikle buzul hareket hızı ile çarpışma riski arasındaki korelasyon katsayısı $r = 0.82$ ($p < 0.01$) olup, bu ilişki "çok güçlü" olarak değerlendirilmiştir. Genel risk indeksi ($r = 0.76$) ve navigasyon zorlukları ($r = 0.69$) da benzer şekilde güçlü korelasyonlar gösterirken, gemi güzergâh değişimi ile buzul hareketi arasındaki ilişki ($r = 0.58$) nispeten daha zayıf kalmıştır. Bu bulgular, buzul hareket hızı arttıkça deniz taşımacılığında çarpışma riskinin, navigasyon zorluklarının ve genel riskin belirgin şekilde yükseldiğini; güzergâh değişikliklerinin ise riski tamamen ortadan kaldırmadığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, özellikle buzul dinamiklerinin yoğun olduğu bölgelerde, risk yönetimi ve proaktif navigasyon stratejilerinin kritik önem taşıdığı vurgulanmaktadır.

6. Bildirim ve Erken Uyarı Sistemi Çıktıları

Geliştirilen bildirim ve erken uyarı sistemi, toplanan verileri işleyerek belirli risk türleri hakkında kullanıcılara otomatik uyarılar göndermekte ve böylece hızlı müdahale imkânı sunmaktadır. Tablo 6'da kutup bölgelerinde çalışan erken uyarı sisteminin farklı risk türleri için doğruluk oranlarını ve yanlış pozitif/negatif oranlarını gösteren sonuçlar özetlenmiştir.

Risk Türü	Doğruluk Oranı (%)	Yanlış Pozitif Oranı (%)	Yanlış Negatif Oranı (%)
Deniz Buzu Hareketleri	92.1	4.8	3.1
Buz Dağı Oluşumu ve Ayrışması	88.7	6.3	5.0
Yoğun kar ve Buz Fırtınaları	91.6	5.5	2.9
Denizcilik Tehlikeleri (Akıntılar, Görüş Engelleri)	86.9	7.0	6.1
Genel Ortalama	89.8	5.9	4.3

Tablo 6: Erken Uyarı Sisteminin Performans Analizi

Tablo 6'ya göre, kutup bölgelerindeki erken uyarı sistemi, deniz buzu hareketleri ve yoğun kar fırtınaları gibi meteorolojik olayları %90'ın üzerinde doğrulukla tespit ederken, buz dağı ayrışmaları ve ekosistem değişimlerinde yüksek yanlış pozitif oranları nedeniyle bazı olayları gereğinden riskli değerlendirdiği gözlemlenmiştir. Denizcilik tehlikelerinde ise sistemin doğruluk oranı diğer risk türlerine kıyasla daha düşük olup, %6,1 yanlış negatif oranıyla küçük ölçekli akıntılar ve yerel görüş değişikliklerini tespit etmekte zorlandığı anlaşılmaktadır. Genel olarak sistem, kutup bölgelerindeki risklerin büyük çoğunluğunu başarıyla tanımlayarak erken uyarı sağlasa da yüksek yanlış pozitif oranları ve denizcilikteki sınırlı hassasiyet nedeniyle ek sensör verileri ve model iyileştirmeleri gerekmektedir. Bu bulgular, uydu verileri, yapay zekâ ve İHA entegrasyonunun yüksek doğruluk sağladığını ancak dinamik süreçlerde daha fazla veri zenginleştirmesine ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Gerçek zamanlı veriler, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı otomatik bildirim sistemine entegre edilmiştir. Erken uyarı sistemi sayesinde olası kuraklık ve arazi değişimleri önceden tespit edilerek yetkili kurumlara bildirilmiştir. Örnek bir bildirim görsel 16'da sunulmuştur.



Görsel 16: Erken Uyarı Sisteminden Örnek Bir Bildirim

Görsel 16’da geliştirilmiş erken uyarı sisteminin gönderdiği örnek bir bildirim ekranı yer almaktadır. Bu bildirimde, risk türü, konum bilgisi, oluşum zamanı ve önerilen önlemler gibi kritik bilgiler kullanıcıya anlık olarak iletilmektedir. Sistem, belirlenen eşik değerleri aşıldığında veya olası bir tehlike saptandığında otomatik olarak bildirim üretmekte ve böylece çevresel risklere karşı hızlı tepki verilmesine imkân tanımaktadır. Bu sayede, kullanıcılar gerek saha ekiplerini yönlendirmek gerekse veri analizi yapmak için zamanında ve doğru bilgiler elde edebilmektedir.

Sonuç ve Tartışma

Yapılan çalışma, uzaktan algılama, yapay zekâ ve insansız hava araçları (İHA) kullanarak arazi analizi ve çevresel faktörlerin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir metodoloji sunmuştur. Bu çalışma, buzul dinamiklerinin izlenmesinde mevcut yöntemlerin sınırlılıklarını aşmak için yapay zekâ destekli çoklu sensör entegrasyonunu başarılı bir şekilde uygulamıştır. Geleneksel saha ölçümleri ve statik küresel envanterlerin (örneğin, Randolph Buzul Envanteri - RGI Consortium, 2023) sunduğu veri sıklığının yetersizliği ve optik uydu görüntülerinin (Landsat gibi) bulutluluk ve karanlık dönemlerdeki sınırlamaları (Maslov ve diğ., 2025) bu çalışmada entegre edilen İHA görüntüleme yöntemleriyle aşılmıştır.

Çalışmada geliştirilen İHA, optik uydu verilerine kıyasla atmosferik koşullardan etkilenmeden veri toplayabilme kapasitesiyle ön plana çıkmıştır (Harcourt ve diğ., 2022). Bu teknoloji, özellikle kalving olaylarının gerçek zamanlı takibinde geleneksel yöntemlere göre %40 daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Ayrıca, Landsat verileriyle entegre edilen İHA tabanlı yüksek çözünürlüklü görüntüler, saha gözlemleriyle karşılaştırıldığında buzul sınırlarının tespitinde %30 oranında daha hassas sonuçlar sunmuştur.

Derin öğrenme algoritmalarının kullanımı da bu çalışmanın yenilikçi yönlerinden biridir. Hibrit konvolüsyonel-transformator modelleri (örneğin, GlaVITU) ile yapılan analizler, buzul sınırlarını haritalamada %85’in üzerinde doğruluk oranına ulaşmıştır (Maslov ve diğ., 2025). Bu oran, geleneksel görüntü işleme tekniklerine kıyasla kayda değer bir iyileşmeyi temsil etmektedir.

Yerli ve milli kaynaklarla geliştirilen bu sistemler, sadece teknik başarı sağlamamakta, aynı zamanda çevresel izleme alanında ulusal kapasitenin artırılmasına da katkı sunmaktadır. Bu çalışma, küresel literatürdeki benzer projelerden farklı olarak radar, İHA ve uydu verilerini entegre ederek daha kapsamlı ve güvenilir bir izleme altyapısı ortaya koymuştur.

Elde edilen sonuçlar, uydu görüntüleriyle saha verilerinin karşılaştırılmasının, yapay zekâ destekli algoritmaların doğruluğunu artırdığını ortaya koymuştur. Yapay zekâ tabanlı analizler sonucunda arazi sınıflandırma doğruluğunun 2 katı oranında iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Özellikle CNN ve Random Forest algoritmaları, bitki örtüsü tespiti, toprak nemi analizi ve su kaynaklarının belirlenmesi açısından yüksek başarı sağlamıştır.

İHA tabanlı veri toplama sürecinde, hiper spektral ve termal görüntüleme sistemlerinin entegrasyonu sayesinde saha verileri ile uydu verileri arasındaki hata oranı (RMSE) önemli ölçüde azaltılmıştır. Gerçek zamanlı veri aktarımı, doğal afet izleme, tarımsal yönetim ve su kaynaklarının korunması gibi alanlarda büyük avantajlar sunmuştur.

Ancak çalışmada bazı kısıtlar ve zorluklarla karşılaşmıştır:

- İHA uçuş süresinin kısıtlı olması, geniş ölçekli veri toplama süreçlerinde verimliliği düşürmesi,
- Makine öğrenmesi modellerinde yüksek doğruluk için büyük ve dengeli bir veri setine ihtiyaç duyulması,
- Gerçek zamanlı veri akışının büyük hacimli veri işlemede bazı gecikmelere neden olması.

Bununla birlikte, çalışmanın bulguları, uzaktan algılama ve yapay zekâ temelli analizlerin çevresel izleme, tarımsal sürdürülebilirlik ve doğal kaynak yönetimi gibi alanlarda uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Gelecekte, 5G tabanlı IoT sistemleri, blockchain destekli veri güvenliği ve daha gelişmiş otonom İHA sistemleri kullanılarak doğruluk ve hız artırılabilir. Yapılan çalışma, yerli ve milli olarak geliştirilen İHA ve yazılımların kullanımı sayesinde, çevresel izleme süreçlerinde ulusal teknoloji kapasitesini güçlendirmekte ve ülke kaynaklarının etkin kullanımına katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, uzaktan algılama ve yapay zekâ temelli çevresel izleme alanında literatürdeki benzer çalışmalardan, çoklu veri kaynaklarının entegrasyonu ve gerçek zamanlı analiz kapasitesiyle ayrılmaktadır. Özellikle, hiper spektral ve termal görüntüleme sistemlerinin İHA platformlarına entegre edilmesi, saha verileri ile uydu verileri arasındaki uyumu artırarak, daha hassas ve güvenilir analizler sunmuştur. Mevcut araştırmalar çoğunlukla tekil veri kaynaklarına odaklanırken, bu proje farklı veri türlerini bir araya getirerek analiz doğruluğunu önemli ölçüde artırmayı başarmıştır. Farklı veri türlerinin entegrasyonu ve gerçek zamanlı analiz kapasitesiyle, geleneksel yöntemlere kıyasla daha esnek ve ölçeklenebilir bir çözüm sunarak çevresel yönetim süreçlerinde yenilikçi bir yaklaşım ortaya koyulmuştur.

Sonuç olarak, yapılan araştırma farklı veri kaynaklarının entegrasyonu ile arazi analizinin hassasiyetini artırmada etkili bir yöntem sunmuş, uzaktan algılama ve yapay zekâ destekli çevresel izleme sistemlerinin potansiyelini ortaya koymuştur.

Öneriler

Bu çalışmanın bulguları ışığında, benzer projeler geliştirecek araştırmacı ve geliştiricilere veri kaynaklarının çeşitlendirilmesi amacıyla Landsat uydu verilerine ek olarak Sentinel, MODIS ve yüksek çözünürlüklü ticari uyduların entegrasyonu önerilmekte; ayrıca SAR (Sentetik Apertür Radar) teknolojisiyle bulut örtüsü gibi atmosferik engellerin etkisinin azaltılması tavsiye edilmektedir. Gerçek zamanlı veri akışının optimizasyonu için IoT sensörleri ve 5G altyapısı kullanılarak saha verilerinin anlık işlenmesi, dağıtık defter teknolojisi (blockchain)

ile de veri bütünlüğünün ve şeffaflığının sağlanması önerilir. İHA teknolojisinin geliştirilmesi bağlamında, uzun menzilli uçuş sürelerine sahip çoklu sensörlü İHA'ların yanı sıra, otonom İHA filolarıyla geniş alanlarda senkronize veri toplama stratejileri öne çıkarılmaktadır. Uydu ve İHA verilerindeki gürültü azaltma için Wavelet Dönüşümü veya Derin Sinir Ağları (Autoencoder) tabanlı otomatik temizleme algoritmaları geliştirilebilir; örneğin, multispektral görüntülerdeki atmosferik parazitlerin filtrelenmesinde bu yöntemler kritik rol oynayabilir. Ayrıca, sensör füzyonu teknikleri (örneğin, Kalman Filtreleri, Bayes Ağları) kullanılarak Lidar, SAR ve optik verilerin entegrasyonu iyileştirilebilir, bu da topografik analizlerde hata payını minimize ederek yüksek doğruluklu haritalama sağlayacaktır. Bu teknik iyileştirmeler, çevresel izleme sistemlerinin veri kalitesini, ölçeklenebilirliğini ve güvenilirliğini artıracak; akademik, endüstriyel ve toplumsal paydaşlar için sürdürülebilir ve etkin bir izleme ekosistemi oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- IPCC. (2018). Global Warming of 1,5°C. Erişim: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Maslov, K. A., Persello, C., Schellenberger, T., & Stein, A. (2025). Globally scalable glacier mapping by deep learning matches expert delineation accuracy. *Nature Communications*, 16(43).
- Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). Glacier remote sensing using Sentinel-2. *Remote Sensing*, 8(7), 575.
- RGI Consortium. (2023). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 7.
- Öztürk, T., & Gürsoy, F. (2022). Küresel iklim değişikliğinin Arktik Okyanusu'na jeopolitik etkisi. *Akdeniz İİBF Dergisi*, 22(1), 117-131.
- Harcourt, W. D., Robertson, D. A., Macfarlane, D. G., Rea, B. R., Spagnolo, M., Benn, D. I., & James, M. R. (2022). Glacier monitoring using real-aperture 94 GHz radar. *Annals of Glaciology*, 9(387-89), 115–120.
- Bassil, Y. (2012). A simulation model for the waterfall software development life cycle. arXiv preprint arXiv:1205.6904.
- Buchori, A., Setyosari, P., Dasna, I. W., & Ulfa, S. (2017). Mobile augmented reality media design with waterfall model for learning geometry in college. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(13), 3773-3780.
- Khan, A. A., Jamil, A., Hussain, D., Ali, I., & Hameed, A. A. (2023). Deep learning-based framework for monitoring of debris-covered glacier from remotely sensed images. *Advances in Space Research*, 71(7), 2978-2989.
- Howells, I. (2022). Report of sailing expedition Falmouth-East Greenland-Falmouth.
- Sheridan, I. (2020). Drones and global navigation satellite systems: Current evidence from polar scientists. *Royal Society open science*, 7(3), 191494.
- Günaydın, E., Selbesoğlu, M. O., Karabulut, M. F., Vassilev, O., Akpınar, B., Yanalak, M., ... & Özsoy, B. (2025). PPK yöntemi ile İHA verilerinden üretilen ortofoto ve SYM ürünlerinin konumsal doğruluğunun araştırılması: Antarktika'daki Horseshoe Adası örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(1), 10-17.
- Wang, L., Que, H., & Wu, F. (2024). The CNN-LSTM-attention model for short term prediction of the polar motion. *Measurement Science and Technology*, 36(1), 016323.