



SENTİNEL-2A MSI VE LANDSAT-9 OLI-2 GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK FARKLI GEÇİRİMSİZ YÜZEY İNDEKSLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ: SAMSUN ÖRNEĞİ

Comparative Evaluation of Various Impervious Surface Indices Using Sentinel-2A MSI and Landsat-9 OLI-2 Images: A Case of Samsun

Derya ÖZTÜRK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye
dozturk@omu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-0684-3127

(Teslim: 15 Eylül 2022; Düzeltme: 21 Kasım 2022; Kabul: 6 Aralık 2022)

(Received: September 15, 2022; Revised: November 21, 2022; Accepted: December 6, 2022)

Abstract

The world is experiencing rapid urbanization, and many natural areas are transformed into impervious surfaces through urbanization. The increase in impervious surfaces in urban areas leads to the deterioration of the environment and a decrease in natural resources. Therefore, information about impervious surfaces, a primary indicator of urban construction, is needed in studies on urbanization and its environmental effects. Obtaining spatio-temporal urban impervious surface information in an accurate and cost-effective manner is essential for supporting sustainable urban development. Today, impervious surface indices based on remote sensing technology can effectively extract impervious surface areas. However, the difficulty of the impervious surface extraction complicates the selection of the method to get the optimum result. In this study, the performance of six different impervious surface indices, including Urban Index (UI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI), Index-based Built-up Index (IBI), Combinational Biophysical Composition Index (CBCI), Enhanced Normalized Difference Impervious Surfaces Index (ENDISI), and Normalized Impervious Surface Index (NISI), were employed to extract impervious surfaces from Sentinel-2A MSI and Landsat-9 OLI-2 images in an area of Samsun, where has high urbanization potential. The results were evaluated by spectral discrimination index and error matrix approach. Additionally, the effects of indices were investigated using visual assessments. The results showed that ENDISI was the best-performing index in both Sentinel-2A MSI and Landsat-9 OLI-2 images in the study area, but Sentinel-2A MSI gave higher accuracy than Landsat-9 OLI-2. In the extraction of impervious surfaces using the ENDISI index, the overall accuracy for Sentinel-2A MSI is 91.53% and the kappa value is 0.8301, while the overall accuracy for Landsat-9 OLI-2 is 78.29% and the kappa value is 0.5646. The study's results revealed that Sentinel-2 and Landsat-9 satellite images have a significant potential for impervious surface extraction, and the extraction success can be increased with the optimum result to be determined by comparisons based on different satellite images and indices.

Keywords: Impervious Surface Index, Sentinel-2, Landsat-9, accuracy, comparison

Öz

Dünyada hızlı bir kentleşme yaşanmakta ve kentleşme süreciyle birlikte önemli miktarda doğal alan geçirimsiz yüzeylere dönüşmektedir. Kentsel alanlarda geçirimsiz yüzeylerin artması, çevrenin bozulmasına ve doğal kaynakların azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, kentleşme ve kentleşmenin çevresel etkileriyle ilgili çalışmalarda kentsel yapılaşmanın temel bir göstergesi olan geçirimsiz yüzeylerle ilgili bilgilere gereksinim duyulmaktadır. Kentsel geçirimsiz yüzey bilgilerinin zamanında, maliyet etkin ve doğru bir şekilde elde edilmesi, sürdürülebilir kentsel gelişimin desteklenmesi için büyük önem taşımaktadır. Günümüzde uzaktan algılama teknolojisine dayalı geçirimsiz yüzey indeksleri, geçirimsiz yüzey alanlarının elde edilmesinde etkin olarak kullanılabilir. Ancak geçirimsiz yüzey çıkarımının karmaşıklığı, optimum sonucu elde etmek için yöntem seçimini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada Samsun'da yüksek kentleşme potansiyeli olan bir alanda Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 görüntülerinden geçirimsiz yüzey çıkarımında Kent İndeksi (Urban Index-UI), Normalleştirilmiş Fark Yapay Alan İndeksi (Normalized Difference Built-up Index-NDBI), İndeks Tabanlı Yapay Alan İndeksi (Index-based Built-up index-IBI), Kombinasyonel Biyofiziksel Bileşim İndeksi (Combinational Biophysical Composition Index-CBCI), Geliştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Enhanced Normalized Difference Impervious Surfaces Index-ENDISI) ve Normalleştirilmiş Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Normalized Impervious Surface Index-NISI) olmak üzere altı farklı geçirimsiz yüzey indeksinin performansı spektral ayırım indeksi ve hata matrisi yaklaşımıyla karşılaştırılmış, ayrıca görsel incelemeler ile indeks etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda ENDISI'nin hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntülerinde en iyi performans gösteren indeks olduğu ancak Sentinel-2A MSI ile Landsat-9 OLI-2'den daha yüksek doğruluk elde edildiği belirlenmiştir. ENDISI indeksiyle geçirimsiz yüzey çıkarımında Sentinel-2A MSI için toplam doğruluk % 91,53 ve kappa değeri 0,8301 iken Landsat-9 OLI-2 için toplam doğruluk % 78,29 ve kappa değeri 0,5646'dır. Çalışmanın sonuçları Sentinel-2 ve Landsat-9 uydu görüntülerinin geçirimsiz yüzey

çıkarmında önemli bir potansiyele sahip olduğunu ve farklı uydu görüntüleri ve indekslere dayalı karşılaştırmalarla belirlenen optimum sonuç ile geçirimsiz yüzey çıkarma başarısının artırılabilceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Geçirimsiz Yüzey İndeksi, Sentinel-2, Landsat-9, doğruluk, karşılaştırma

1. GİRİŞ

19. yüzyılın sonlarında yaşanan ikinci sanayi devriminden itibaren artan nüfus ve kentsel alanlara göç nedeniyle dünyada hızlı bir kentleşme yaşanmıştır (Li, 2019). Birleşmiş Milletler'in 2018 raporuna göre şehirlerde ikamet edenlerin oranı 1900 yılında % 13,3 iken 1970 yılında % 35,6'ya, 2018 yılında ise % 55,3'e yükselmiştir ve 2050 yılında % 68'in üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir (Li, 2019; Kaur & Pandey, 2022). Araştırmalar, büyümenin çoğunun gelişmekte olan ülkelerde gerçekleşeceğini ve kentlerin kendi boyutlarının üç katına kadar genişleyebileceğini öne sürmektedir (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Kentleşme süreci, kentlerin genişlemesinin ve yoğunluğunun artmasının yanı sıra artan kentsel nüfusa bağlı olarak yeni kentlerin kurulmasına da neden olmaktadır (Xi, Thinh, & Li, 2019; Mourya, Kumari, Tayyab, Paarcha, & Rahman, 2021; Kaur & Pandey, 2022). Hızlı kentleşmeyle birlikte orman ve tarım alanları gibi çok sayıda doğal yüzey, büyük ölçüde geçirimsiz yüzeylerden oluşan konut, ulaşım, endüstriyel ve ticari alanlara dönüşmektedir (Weng, 2012; Li, 2019; Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Kentsel alanlarda biyofiziksel çevre; açık arazi, bitki örtüsü alanları ve yapılaşmış arazilerden oluşur (Deng, Wu, Li, & Chen, 2015; Hidayati & Suharyadi, 2019). Geçirimsiz yüzeyler; yollar, kaldırımlar, otoparklar ve çatılar gibi yağmur suyunun toprağa sızmadığı antropojenik arazi yüzeyi özellikleridir (Fan, Fan, & Weng, 2015; Wang, Gang, Li, Chen, & Li, 2015; Li, 2019; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022).

Kentsel alanlar, heterojen özellikte karmaşık ekosistemlerdir (Kaur & Pandey, 2022). Kentsel geçirimsiz yüzeylerin doğru haritalanması, kentsel arazi kullanımı/örtüsü değişimlerinin anlaşılması ve geçirimsiz yüzey değişiminden kaynaklanan çevre sorunlarının incelenmesinde çok önemlidir (Li, 2019; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Geçirimsiz yüzeyler, kentsel alanların ana bileşenidir ve kentsel büyüme/yayılma derecesinin değerlendirilmesinde yaygın olarak önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir (Li, 2019; Kaur & Pandey, 2022). Geçirimsiz yüzeyler aynı zamanda kentleşmenin neden olduğu çevresel etkileri de artıran en önemli unsurlardan biridir (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Doğal veya yarı doğal yüzeylerin geçirimsiz yüzeylere dönüşmesi, radyasyon bütçesini etkileyerek yerel yüzey ve hava sıcaklıklarında artışa neden olmaktadır

(Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Geçirimsiz yüzeylerin artması, yüzey akışının hacminde, süresinde ve yoğunluğunda artışa neden olurken yeraltı suyu beslemesinin azalmasına neden olur ve sel tehlikesini artırır. Ayrıca kaynak kirleticilerin akışını doğrudan etkiledikleri için alıcı su kaynaklarının bozulması da bir diğer olumsuz etkidir (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Bu kapsamda geçirimsiz yüzey bilgisi, kentleşme derecesinin ve çevresel kalitenin önemli bir göstergesidir (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021).

Geçirimsiz yüzey alanları, Birleşmiş Milletler tarafından gelişmekte olan dünya için hedeflenen "Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri"nin geliştirilmesine de katkı sağlayabilir. Hedef 11, şehirleri güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlarken, Hedef 6, şehirlerin büyüme oranları ve genişleme modelleri hakkında kapsamlı bilgi talep ederek herkes için erişilebilir su ve atıksu hizmetlerinin ve sürdürülebilir su yönetiminin güvence altına alınmasını hedeflemektedir (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Buna göre geçirimsiz yüzeylerin mekânsal dağılımı ile ilgili bilgiler, kentsel arazi kullanımının sürdürülebilirliğini sağlamak için kaynak ve hizmet tahsisi ve dağıtımını açısından çeşitli karar verme süreçleri için daha da önemli hale gelmiştir (Liu, Zhao, Muhammad, Liu, & Chen, 2020; Kaur & Pandey, 2022). Bu nedenlerle yerleşim alanlarıyla çevresel parametreler arasındaki ilişkinin izlenmesi, risk değerlendirmesi, çevresel kalitenin incelenmesi, kaynak yönetimi, kentsel planlama ve sürdürülebilir kentsel gelişimin desteklenmesi için genişleyen ve değişen geçirimsiz yüzey alanlarının geometrisi ve konfigürasyonu ile ilgili maliyet etkin ve hızlı bilgi gereksinimi zorunlu olmaktadır (Kaur & Pandey, 2022; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022).

Geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde alan ölçümleri ve uzaktan algılama teknolojileri kullanılmaktadır. Klasik yersel ölçmeler ve küresel konum belirleme sistemi (Global Navigation Satellite Systems-GNSS) ölçmelerine dayalı alan ölçümleri yüksek doğrulukta ve güvenilir olmasına rağmen, pahalı ve zaman alıcıdır (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Buna karşın, farklı zamansal, spektral ve mekânsal çözünürlüğe sahip uzaktan algılama verileri, arazi örtüsünün hızlı ve sinoptik görünümünü sunma kabiliyeti nedeniyle, özellikle geniş alanlarda kentsel

yerleşim alanlarının mekânsal dağılım düzenini ve genişleme derecesini belirlemek için hızlı ve maliyet etkin bir teknoloji olması nedeniyle ideal bir araç olarak kabul edilir (Bhatti & Tripathi, 2014; Kaur & Pandey, 2022). 1972 yılında ilk sivil yer gözlem uydusunun uzaya fırlatılmasıyla başlayan uzaktan algılama teknolojisine dayalı geçirimsiz yüzey çıkarımı üzerine araştırmalar, 1990'ların sonlarından itibaren uydu sayılarının artmasıyla giderek zenginleşen uzaktan algılama veri kümeleri sayesinde özellikle son yıllarda önemli bir artış göstermiş (Fan, Fan, & Weng, 2015; Xi, Thinh, & Li, 2019; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022) ve geçirimsiz yüzeylerin kantitatif analiziyle ilgili birçok çalışmada uzaktan algılamanın potansiyeli ortaya konulmuştur (Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Bu süreçte uzaktan algılama, geniş alan kapsamı, düzenli tekrar ziyaret süresi ve çoklu spektral bant özellikleriyle kentsel büyüme/yayılma ve arazi kullanımı/örtüsü değişimlerini belirleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Wang, Gang, Li, Chen, & Li, 2015; Li, 2019; Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021).

Geçirimsiz yüzeylerin uzaktan algılama teknolojisiyle elde edilen uydu görüntülerinden haritalanması için çeşitli yöntemler önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında görsel yorumlama sonucunda manuel sayısallaştırma en basit ve doğru yöntem olarak kabul edilmiştir. Ancak geçirimsiz yüzeylerin, geniş alanlar için manuel olarak sayısallaştırılması zaman alıcı ve zordur, ayrıca görüntünün çözünürlüğü yeteri kadar yüksek değilse görsel yorumlama gücü de azalmaktadır (Li, 2019). Günümüzde uzaktan algılama ile geçirimsiz yüzeylerin otomatik/yarı otomatik çıkarımına ilgi artmış olup bu kapsamda spektral karışım analizi, regresyon modelleri, makine öğrenme yöntemleri ve spektral indeksler kullanılmaktadır (Kaur & Pandey, 2022; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Geçirimsiz yüzeylerin uydu görüntülerinden çıkarımında spektral indeksler, diğer yöntemlere göre basit, düşük işlem süreli ve kolay uygulanabilir olma avantajları nedeniyle değerli araçlar olarak kabul edilmektedir (Bouhennache, Bouden, Taleb-Ahmed, & Cheddad, 2019; Kaur & Pandey, 2022; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Bu kapsamda kentsel geçirimsiz yüzeyleri haritalamak için uzaktan algılama teknolojisiyle görünür, yansıtıcı kızılötesi (yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi) ve termal kızılötesi bantlara dayanan çeşitli geçirimsiz yüzey indeksleri tanımlanmıştır (Wang, Gang, Li, Chen, & Li, 2015; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Geçirimsiz yüzey indeksleri, geçirimsiz ve geçirgen yüzeyler arasındaki spektral fark kullanılarak oluşturulur (Li,

2019; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Bu indekslerle geniş alanlarda geçirimsiz yüzeyler otomatik ve hızlı bir şekilde haritalanabilmektedir (Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Ancak kentsel geçirimsiz yüzeylerin haritalanmasında spektral indekslerin uygulanabilirliği ve etkinliği kanıtlanmış olsa da (Li, 2019) bazı geçirimsiz yüzey malzemeleri ve diğer arazi yüzeylerinin benzer spektral özellik göstermesi, kentsel alanlardaki mekânsal heterojenlik ve karışık piksel problemi nedeniyle geçirimsiz yüzey bilgilerinin çıkarılmasında bazı zorluklar bulunmaktadır (Fan, Fan, & Weng, 2015; Sinha, Verma, & Ayele, 2016; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Uzaktan algılama uydu sensörlerindeki gelişmelere rağmen, karışık piksel problemi nedeniyle oluşan belirsizlik ve çıplak toprak bileşenlerinin çeşitliliği (çeşitli toprak tipleri, toprak renkleri ve toprak yansıma spektrumları) nedeniyle toprağın etkili bir şekilde tanımlanmasındaki zorlukların yarattığı sınırlamalar devam etmektedir (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019; Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Özellikle düşük albedolu antropojenik geçirimsiz yüzey malzemelerin yansıma spektrumlarının çıplak toprağinkine benzerlik gösterebilmesi geçirimsiz yüzey çıkarımında daha düşük doğruluğa neden olabilmektedir (Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Karışık pikseller de, kentsel arazi kullanımı/örtüsü sınıflandırmasında uydu görüntülerinin etkin kullanımını etkileyen önemli bir problem olarak kabul edilmektedir (Fan, Fan, & Weng, 2015; Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020). Düşük yoğunluklu yerleşim alanlarındaki karışık piksellerde özellikle yüksek albedo geçirimsiz yüzey alanları söz konusu olduğunda geçirimsiz yüzey alanları genellikle aşırı değerlendirir yani olduğundan daha fazla alan geçirimsiz yüzey olarak sınıflanır. Piksel boyutu arttıkça bu etki de artar (Hidayati & Suharyadi, 2019; Xia, Zhang, & Yeh, 2020).

Mevcut sınırlamalar nedeniyle geçirimsiz yüzey alanı çıkarım başarısını artırmak için çok sayıda spektral indeks tanımlanmıştır. Kaur & Pandey (2022) bugüne kadar geçirimsiz yüzey çıkarımı ile ilgili araştırmalarda kullanılan indeks sayısının 30'u aştığını belirtmektedir. Birçok uydu görüntüsünde termal bant bulunmadığı için elektromanyetik spektrumun görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi dalga boylarındaki bantlara dayalı indeksler daha geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Bu kapsamda en eski indeksler arasında yer alan Kent İndeksi (Urban Index-UI), Normalleştirilmiş Fark Yapay Alan İndeksi (Normalized Difference Built-up Index-NDBI) ve İndeks Tabanlı Yapay Alan İndeksi (Index-based Built-up Index-IBI) birçok araştırmacı tarafından geçirimsiz yüzey çıkarımında başarıyla uygulanmıştır

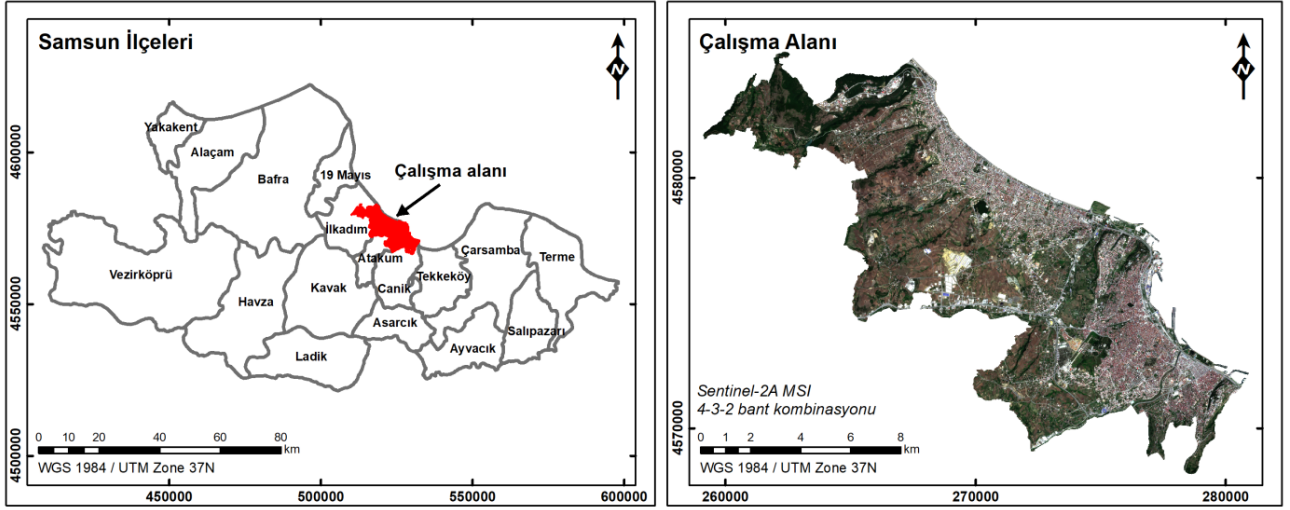
(Zhang, Odeh, & Han, 2009; Varshney & Rajesh, 2014; Daramola, Eresanya, & Ishola, 2018; Ali, Hasim, & Abidin, 2019). Ancak bu indekslerin çıplak topraktan çok fazla etkilenmeleri yeni indekslerin araştırılmasına neden olmuştur (Zhang, Tian, & Liu, 2020; Kaur & Pandey, 2022). Son yıllarda geliştirilen Kombinasyonel Biyofiziksel Bileşim İndeksi (Combinational Biophysical Composition Index-CBCI), Geliştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Enhanced Normalized Difference Impervious Surfaces Index-ENDISI) ve Normalleştirilmiş Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Normalized Impervious Surface Index-NISI) geçirimsiz yüzey çıkarımında araştırmacıların ilgisini çekmiş ve kısa süre yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Zhang, Yang, Ma, & Li, 2021; Dixit, Chaurasia, Mishra, Singh, & Lee, 2022; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Geçirimsiz yüzey indekslerin her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır ve farklı coğrafi konumlar, mekânsal ölçekler ve arazi örtüsü/kullanımı desenlerine bağlı olarak değişen sonuçlar üretirler (Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020). Ayrıca bir indeksin performansı, uydu verilerinin spektral ve mekânsal çözünürlükleri, görüntünün alınma zamanı, görüntü tarihinde alanın hava koşulları gibi çeşitli faktörlere karşı da hassastır (Varshney & Rajesh, 2014; Kaur & Pandey, 2022). Bu nedenle farklı indekslerin karşılaştırmasına dayalı yaklaşımlar verimliliği artırarak belirsizliği azaltmaktadır (Hidayati & Suharyadi, 2019; Xi, Thinh, & Li, 2019; Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Ma & Wang, 2021; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022). Bununla birlikte, spektral indekslerden geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde birçok uydu görüntüsü alternatifinin bulunması farklı uydu görüntülerinden daha yüksek performans gösteren sonuçların kullanılmasını desteklemektedir (Xi, Thinh, & Li, 2019; Deliry, Avdan, & Avdan, 2021). Özellikle orta çözünürlüklü (10–30 m) yer gözlem uydularından Landsat serisi ve Sentinel-2 verilerinin ücretsiz ve herkese açık veri erişim politikası bu verilere dayalı çalışmaların yaygınlaşma potansiyelini artırmaktadır (Shrestha, Stephen, & Ahmad, 2021). Sentinel-2 Landsat'tan daha yüksek mekânsal çözünürlükle üstün olsa da Landsat verilerinin 1972'ye kadar uzanması ve geniş bir periyot için arşiv verileri sağlaması önemli bir avantajdır (Liu & Trinder, 2018).

Bu çalışmanın araştırma hedefleri Türkiye'nin en yüksek nüfus artışı ve yapılaşma oranına sahip illerinden biri olan Samsun'da 2022 yılı Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüleri kullanılarak farklı spektral indekslerin geçirimsiz yüzey çıkarım

performanslarının doğruluk değerlendirmelerine dayalı olarak karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 görüntüleri kullanılarak UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI indeksleri uygulanmış, spektral ayırım indeksi (Spectral Discrimination Index-SDI) ve hata matrisi yaklaşımı ile doğrulukları değerlendirilmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI

Samsun, 40°50'- 41°51' kuzey enlemleri, 34°25' ve 37°08' doğu boylamları arasında yer alır. Yaklaşık 9725 km²'lik bir alana sahiptir ve 17 ilçeden oluşmaktadır (Harita Genel Müdürlüğü, [HGM], 2022). Kuzeyinde Karadeniz'le 210 km'lik oldukça uzun bir kıyı şeridi bulunur. Doğusunda Ordu, batısında Sinop, güneyinde Tokat ve Amasya, Güney batısında ise Çorum illeriyle komşudur (Öztürk & Gündüz, 2019). Karadeniz kıyısındaki en eski yerleşmelerden biri olan Samsun, coğrafi şartların uygunluğu, ılıman iklimi, ulaşım kolaylığı gibi faktörler ve tarım, turizm, ticaret, sanayi ve eğitim fonksiyonlarının etkisiyle cazip bir yerleşim yeri haline gelmiştir (Hekimoğlu, Altındeğer, & Demirbaş, 2007; Öztürk & Gündüz, 2019). Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2021 verilerine göre, Samsun nüfus bakımından Türkiye'nin 16. büyük ilidir. 1990 yılında 1.158.400 olan nüfus, 2000 yılında 1.191.926, 2010 yılında 1.252.693, 2021 yılında 1.371.224'e ulaşmış olup (TÜİK, 2022) yüksek bir nüfus artış potansiyeline sahiptir (Ozturk, 2017a,b). Yıllar içinde nüfus artışı ve sosyo-ekonomik gelişmeler sonucunda ortaya çıkan hızlı kentleşme baskısı, özellikle kıyı alanlarında arazi kullanımı/örtüsü deseninin değişimine ve geçirimsiz yüzeylerin artmasına neden olmuştur (Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü, 2012; Öztürk & Gündüz, 2020). Samsun'un kıyı ilçelerinden Atakum, İlkadım ve Canik, Samsun'a bağlı 17 ilçeden nüfus artış hızının en yüksek olduğu üç ilçedir. Atakum, İlkadım ve Canik 2008 yılına kadar birinci kademe belediyeler olup, 2008 yılında 26824 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan 5747 sayılı Kanun ile ilçe statüsü kazanmıştır (Ozturk, 2017a). İlçelerin yüzölçüm değerleri; Atakum için 351 km², İlkadım için 155 km² ve Canik için 264 km²'dir (HGM, 2022). Bu çalışmada Atakum, İlkadım ve Canik ilçelerinde yüksek nüfus ve kentleşmenin bulunduğu yerler çalışma alanını oluşturmaktadır (Şekil 1). Bu kapsamda Atakum'da 21 mahalleden oluşan 66,0 km², İlkadım'da 50 mahalleden oluşan 51,6 km² ve Canik'te 16 mahalleden oluşan 9,6 km² olmak üzere toplam 127,2 km² lik alan çalışma alanı kapsamındadır. Belirlenen çalışma alanındaki nüfus, üç ilçenin toplam nüfusunun yaklaşık % 95'idir.

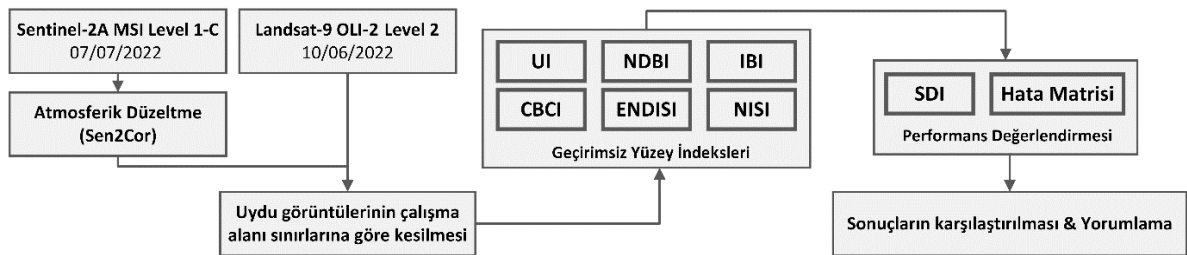


Şekil 1- Çalışma alanı
Figure 1- Study area

3. METODOLOJİ

Bu çalışmada Samsun'da 2022 yılı için geçirimsiz yüzeyler Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntülerinden altı adet spektral geçirimsiz yüzey indeksi (UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI) kullanılarak belirlenmiştir. Görüntülerde önışlemenin ardından geçirimsiz yüzey indeksleri uygulanmış, indeks sonuçlarında optimum eşik değerleri belirlenerek “geçirimsiz yüzeyler” ve “diğer” alanlar olmak üzere iki kategorili tematik haritalar oluşturulmuştur. Oluşturulan geçirimsiz yüzey haritalarının doğruluk değerlendirmesi ve karşılaştırmalar için SDI ve hata matrisi yaklaşımları

kullanılmıştır. Eşik değerlerinin belirlenmesinde kullanılan örneklem noktalar ve hata matrisinden sınıflandırma doğruluğunun değerlendirilmesi için kullanılan referans (test) noktaları Google Earth Pro (GEP) üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılarak toplanmıştır. Gerçekçi ve yansız bir değerlendirme için örneklem ve referans noktaları çakışmayacak şekilde ayrı kümeler olarak seçilmiştir. Önışlemesi tamamlanmış ve analize hazır uydu görüntülerinin ve yardımcı verilerin işlenmesi, indeks analizleri, tematik haritama ve performans değerlendirme işlemleri ArcGIS 10.3 yazılımı kullanılarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana işlem adımlarını gösteren iş akış şeması Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2- Çalışmanın ana işlem adımları
Figure 2- Main steps of the study

3.1. Veri ve Ön İşleme

Geçirimsiz yüzeylerin araştırılmasında U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer veri portalından (U.S. Geological Survey [USGS], 2022a) ücretsiz olarak temin edilen ve açık veri özelliğindeki 07/07/2022 tarihli Sentinel-2A MSI Level 1-C ve 10/06/2022 tarihli Landsat-9 OLI-2 Collection 2 Level-2 görüntüleri kullanılmıştır. Landsat serisinin

son uydusu olan Landsat-9 OLI 27 Eylül 2021'de uzaya fırlatılmıştır. Veri sürekliliğini sağlamak için önceki Landsat-8 OLI sensörüne benzer mekânsal çözünürlüğe ve spektral aralıklara sahiptir. Landsat-9 Collection 2 Level-2 görüntülerinin radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme işlemi USGS tarafından uygulanmış olup analize hazır verilerdir (USGS, 2022b). USGS'nin işlemlerinde veriler, atmosferin alt seviyesine (Bottom-of-Atmosphere-

BOA) dönüştürülmüş ve görüntülerin rektifikasyonunda yeniden örnekleme aşaması için kübik konvolüsyon (cubic convolution) kullanılmıştır. Atmosferik düzeltme arazi yüzey yansımaya kodu (Land Surface Reflectance Code-LaSRC) algoritması (Vermote, Justice, Claverie, & Franch, 2016) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (USGS, 2022c). LaSRC yüzey yansımaya algoritması, yüzey değerlerini elde etmek için gerekli olan atmosferik gazların ve aerosollerin zamansal, mekânsal ve spektral olarak değişen saçılma ve soğurma etkilerini düzeltir (Teixeira Pinto, Jing, & Leigh, 2020).

Sentinel-2A MSI ve Sentinel-2B MSI uyduları sırasıyla 23 Haziran 2015 ve 7 Mart 2017'de uzaya fırlatılmıştır (Xi, Thinh, & Li, 2019). Sentinel-2 MSI Level-1C, rektifikasyonu yapılmış ve radyometrik olarak atmosfer üstü (Top-of-Atmosphere-TOA) yansımaya verilerine dönüştürülmüş verilerdir (European Space Agency, [ESA], 2022a). Bu çalışmada, 07/07/2022 tarihli Sentinel-2A MSI görüntüsünde atmosferik düzeltme işlemi Sen2Cor

kullanılarak gerçekleştirilmiş, Level-1C TOA verileri BOA verilerine dönüştürülmüştür. Sen2Cor, Sentinel-2 Level-2A ürün üretimi ve biçimlendirmesi için ESA tarafından sağlanan bir işlemcidir; Level-1C TOA giriş verilerinin atmosferik, arazi ve sirtus düzeltmesini gerçekleştirir (ESA, 2022b).

İndeks analizlerinde Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 görüntülerinin Blue, Green, Red, NIR ve SWIR1 ve SWIR2 bantları kullanılmış olup, Sentinel-2A MSI görüntüsünde diğer bantlarla entegrasyonu sağlamak için SWIR bantları (bant 11 ve bant 12) ArcGIS 10.3'te "Raster Processing-Resample" aracı kullanılarak en yakın komşu (nearest neighbor) yöntemiyle 10 m piksel boyutuna yeniden örneklenmiştir. Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 verileri WGS 1984 / UTM Zone 37N sistemindedir. Çalışmada kullanılan uydu görüntülerinin teknik özellikleri (USGS, 2022c; Earth Resources Observation and Science Center, 2022) Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1- Sentinel-2 MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntülerinin teknik özellikleri
Table 1- Technical specifications of Sentinel-2 MSI and Landsat-9 OLI-2 satellite images

Sentinel-2 MSI Bantları (µm)	Piksel boyutu (m)	Landsat-9 OLI-2 Bantları (µm)	Piksel boyutu (m)
Bant 1- Coastal (0,433–0,453)	60	Bant 1- Coastal aerosol (0,435–0,451)	30
Bant 2- Blue (0,458–0,523)	10	Bant 2- Blue (0,452–0,512)	30
Bant 3- Green (0,543–0,578)	10	Bant 3- Green (0,533–0,590)	30
Bant 4- Red (0,650–0,680)	10	Bant 4- Red (0,636–0,673)	30
Bant 5- Vegetation Red Edge (0,698–0,713)	20	Bant 5- NIR (0,851–0,879)	30
Bant 6- Vegetation Red Edge (0,733–0,748)	20	Bant 6- SWIR 1 (1,566–1,651)	30
Bant 7- Vegetation Red Edge (0,773–0,793)	20	Bant 7- SWIR 2 (2,107–2,294)	30
Bant 8- Near Infrared (NIR) (0,785–0,900)	10	Bant 8- Panchromatic (0,503–0,676)	15
Bant 8A- Narrow NIR (0,855–0,875)	20	Bant 9- Cirrus (1,363–1,384)	30
Bant 9- Water Vapour (0,935–0,955)	60		
Bant 10- SWIR Cirrus (1,360–1,390)	60		
Bant 11- SWIR 1 (1,565–1,655)	20		
Bant 12- SWIR 2 (2,100–2,280)	20		

3.2. Spektral İndekslerden Geçirimsiz Yüzeylerin Belirlenmesi

Bir indeks, çoklu bantların spektral dönüşümü için matematiksel bir ifade olarak adlandırılabilir. Yüzey özelliklerinin spektral tepkisi, uzaktan algılama indekslerinin temeli olarak kabul edilir. Bu kapsamda spektral indekslerin formülasyonu, her bir arazi örtüsünün farklı dalga boylarındaki spektral imza özelliklerine (yansımaya/absorpsiyon) dayanmaktadır (Kaur & Pandey, 2022). Bu nedenle spektral indekslerden arazi özelliklerinin çıkarımı için uydu verileri kullanılırken, verilerin spektral değerlerini değiştirebilecek kontrast germe ve filtreleme gibi işlemler yapılmamalıdır (Bhatti & Tripathi, 2014).

Spektral indeksler, çok zamanlı ve çok bantlı uydu görüntülerini kullanarak arazi özelliklerini tanımlama, yorumlama, yönetme ve kontrol etme için değerli araçlar olarak değerlendirilmektedir (Bouhennache, Bouden, Taleb-Ahmed, & Cheddad, 2019; Kaur & Pandey, 2022).

Spektral indeksler kapsamında geçirimsiz yüzey indeksleri, özel uyarlanmış algoritmalar kullanarak uzaktan algılama görüntülerinden hızlı ve etkili bir şekilde geçirimsiz yüzey bilgileri sağlar (Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020). Geçirimsiz yüzey indeksleri, hem geçirimsiz yüzeylerin güçlü bir yansımaya hem de farklı arazi örtüsü/kullanım türleri arasında uygun spektral

Tablo 2- Geçirimsiz yüzey indeksleri
 Table 2- Impervious surface indices

İndeks Adı	Kısaltma	Denklem	Referans
Kent İndeksi (Urban Index)	UI	$UI = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}}$	Kawamura, Jayamana, & Tsujiko, 1996
Normalleştirilmiş Fark Yapay Alan İndeksi (Normalized Difference Built-up Index)	NDBI	$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}}$	Zha, Gao, & Ni, 2003
		$IBI = \frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2}$	
		<i>SAVI: Toprak Dengelemeli Bitki İndeksi (Soil Adjusted Vegetation Index)</i> <i>MNDWI: Modifiye Edilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (Modified Normalized Difference Water Index)</i>	
İndeks Tabanlı Yapay Alan İndeksi (Index-based Built-up Index)	IBI	$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})(1 + l)}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + l}$ <i>(l, 0 ile 1 arasında değişen bir düzeltme faktörüdür. Çalışma alanı orta yoğunlukta bitki örtüsüyle kaplı olduğundan bu çalışmada l değeri 0,5 (Huete, 1988) olarak alınmıştır.)</i> $MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}}$ <i>(IBI hesabında NDBI, SAVI ve MNDWI değerlerinin 0-1 aralığına normalleştirilmesi gerekir.)</i>	Xu, 2008
		$CBCI = (A + 1) * MBSI - OSAVI + A$ $MBSI = \frac{(\rho_{Red} - \rho_{Green}) * 2}{\rho_{Red} + \rho_{Green} - 2}$	
Kombinasyonel Biyofiziksel Bileşim İndeksi (Combinational Biophysical Composition Index)	CBCI	<i>OSAVI: Optimize Edilmiş Toprak Dengelemeli Bitki İndeksi (Soil Adjusted Vegetation Index)</i> $OSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + 0,16}$ <i>MBSI: Çıplak Toprak İndeksi (Modified Bare Soil Index)</i> <i>(A düzeltme faktörüdür. Bu çalışmada 0,5 (Chen, Chen, Yang, He, Hou, M., & Shi, 2020) olarak alınmıştır.)</i>	Zhang, Yang, Li, Ma, & Sun, 2018
		$ENDISI = \frac{\rho_{Blue} - \beta * \left(\frac{\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2}} + MNDWI^2 \right)}{\rho_{Blue} + \beta * \left(\frac{\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2}} + MNDWI^2 \right)}$	
Geliştirilmiş Normalleştirilmiş Fark Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Enhanced Normalized Difference Impervious Surfaces Index)	ENDISI	$\beta = \frac{2 * (\rho_{Blue})_{Mean}}{\left(\frac{\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR2}} \right)_{Mean} + ((MNDWI)^2)_{Mean}}$ <i>() mean, ortalama görüntü değeridir. β, ENDISI değerini -1 + 1 aralığına normalize etmek için kullanılan bir düzeltme faktörüdür.)</i>	Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019
Normalleştirilmiş Geçirimsiz Yüzey İndeksi (Normalized Impervious Surface Index)	NISI	$NISI = \frac{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) - \rho_{NIR}}{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) + \rho_{NIR}}$	Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022
Bağıntılarda ρ_{Blue} , ρ_{Green} , ρ_{Red} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} ve ρ_{SWIR2} sırasıyla mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi ve birinci kısa dalga-kızılötesi, ikinci kısa dalga-kızılötesi bantlarının yüzey yansıtım değerleridir.			

farklılığın olduğu multispektral bantları kullanır (Xu, 2010; Kaur & Pandey, 2022). 1990'ların ortalarından itibaren, farklı mekânsal ve spektral çözünürlüklü uydu verileri kullanılarak geçirimsiz yüzeylerin hızlı ve doğru bir şekilde sınıflandırılması ve izlenmesi için çok sayıda spektral geçirimsiz yüzey indeksi formüle edilmiştir (Zhang, Yang, Li, Ma, & Sun, 2018; Capolupo, Monterisi, Caporusso, & Tarantino, 2020; Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Kaur & Pandey, 2022). Bu çalışmada geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI indeksleri uygulanmıştır. İndeks denklemleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

UI indeksinde geçirimsiz yüzeylerin NIR ve SWIR2 bantlarındaki yansıtımları arasındaki zıtlıktan yararlanılması amaçlanmıştır (Kawamura, Jayamana, & Tsujiko, 1996; Kaur & Pandey, 2022). NDBI indeksinin UI indeksinden farkı SWIR2 yerine SWIR1 bandının kullanılmasıdır. NDBI temel olarak kentsel alanların SWIR1 bandındaki yansıtımının NIR bandından daha fazla olduğu esasına dayanır (Zha, Gao, & Ni, 2003). IBI indeksi, bant değerleri yerine indeks değerlerinin kullanımına dayanır ve NDBI, SAVI ve MNDWI indekslerini birleştirir (Xu, 2008). IBI, MNDWI indeksinin kullanımı ile suyla kaplı alanların ve SAVI indeksinin kullanımı ile toprağın geçirimsiz yüzey çıkarımındaki olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlar (Kaur & Pandey, 2022). CBCI indeksi de IBI indeksinde olduğu gibi indeks değerlerinin kullanımı temelindedir. CBCI indeksi MBSI ve OSAVI indekslerinin birleşimine dayalıdır (Zhang, Yang, Li, Ma, & Sun, 2018). ENDISI indeksinde geçirimsiz yüzeyler ve geçirgen yüzeyler arasındaki farkı artırmak için geliştirme faktörü olarak Blue bant ve inhibitör olarak SWIR1 bandının SWIR2 bandına oranı ve MNDWI indeksi kullanılır. Temel varsayım geçirimsiz yüzeylerin Blue bantta daha güçlü yansıtım seviyeleri sunarken, su, bitki örtüsü, çıplak toprak, kurak arazi (kaya, çakıl ve kum) ve gölgeli yüzeyler için yansıtım değerlerinin geçirimsiz yüzeylerden belirgin şekilde daha düşük olmasıdır (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019). Bu nedenle ENDISI indeksi ile geçirimsiz yüzeylerin çıplak toprağın yanı sıra kurak arazilerden de daha iyi ayrılması beklenir. ENDISI indeksinde MNDWI'ın entegre edilmesiyle suyla kaplı alanların etkisinin de azaltılması hedeflenmiştir (Dixit, Chaurasia, Mishra, Singh, & Lee, 2022). NISI indeksi, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki Blue, Green ve Red bantlarına ve NIR bandına dayalı olarak geliştirilmiştir. ENDISI indeksinde olduğu gibi geçirimsiz yüzeylerin Blue bantta daha güçlü yansıtımı, indeksin temel dayanağıdır. NISI indeksinin en önemli avantajı SWIR bandı kullanılmamasından dolayı SWIR bandı olmayan görüntülerin kullanım

kısıtlılığını ortadan kaldırmasıdır (Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022).

İndeksler ArcGIS 10.3 yazılımında "Map Algebra" aracı kullanılarak hesaplanmıştır. UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI için önerilen net bir eşik değeri bulunmadığından (Zhang, Tian, & Liu, 2020), çalışma alanında geçirimsiz yüzey indekslerinin uygulanmasının ardından analiz sonuçlarını "geçirimsiz yüzeyler" ve "diğer" olarak iki kategoriye sınıflandırmak için her spektral indeks için optimum eşik değeri belirlenmiştir. Spektral indeks yaklaşımları eşik değeri seçiminden etkilenir. Bu durum oluşturulan sonuçların belirsizliğini artırır (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019). Eşik seçimi, geçirimsiz yüzey haritalamanın doğruluğunu doğrudan etkilediği için indeksle haritalama sürecinin merkezinde yer alır. Bu çalışmada her bir indeks için optimum eşik değerlerini dinamik olarak ayarlamak ve eşik seçiminin etkisini etkin bir şekilde azaltmak için bilinen piksellerden (GEP üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılmıştır) deneme yanılma (hata ayıklama) yöntemi ile manuel eşik belirleme yaklaşımı (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022) kullanılmıştır. Bunun için tüm geçirimsiz yüzey özelliklerinden (asfalt yol, beton yol, kaldırım, otopark, çatı vb.) çalışma alanına dağılacak şekilde toplam 116 nokta seçilerek başlangıç eşik değeri belirlenmiş, daha sonra geçirimsiz yüzeylerle karışan ve geçirimsiz yüzey alanlarının fazla miktarda çıkmasına neden olan alanlar denetlenerek eşik değerine karar verilmiştir.

3.3. Performans Değerlendirmesi

Analiz sonuçlarının doğruluğunun sadece görsel olarak denetlenmesi yanıltıcıdır. Bu çalışmada geçirimsiz yüzey indeksleriyle oluşturulan tematik haritaların doğruluğu SDI ve hata matrisi yaklaşımlarıyla irdelenmiştir.

Spektral indekslerin sınıflar arasındaki ayrımı ne kadar başarılı ölçüde yaptığını analiz etmek için, sınıfların ortalamalarına ve standart sapmalarına dayalı olarak hesaplanan SDI kullanılmıştır. SDI, iki sınıfın ortalama değerlerinin (μ_i) farkının, sınıfların standart sapmalarının (σ_i) toplamına bölünmesiyle hesaplanır. Negatif değerlerden kaçınmak için, ortalamalardaki farkın mutlak değeri alınır (Denklemler 2) (Bouhennache, Bouden, Taleb-Ahmed, & Cheddad, 2019). $SDI < 1$ ise sınıflar spektral olarak örtüşür ve sınıfları ayırt etme yeteneği zayıftır (zayıf ayırım), $1 < SDI < 3$ ise histogram ortalamaları iyi ayrılmıştır ve bu sınıfların ayırt edilmesi nispeten kolaydır (iyi ayırım), $SDI > 3$ ise, arazi özelliklerinin mükemmel bir ayırımına ulaşılır ve herhangi bir spektral örtüşme meydana gelmez (güçlü ayırım) (Bouhennache,

Bouden, Taleb-Ahmed, & Cheddad, 2019; Baranwal, Ahmad, & Mudassir, 2022). Bu sınıflandırma, spektral ayırımın kalitesini açıklar (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019). SDI değeri arttıkça azalmış spektral karışıklık ile detayları tanımlama gücü artar (Baranwal, Ahmad, & Mudassir, 2022). Bu çalışmada hesaplanan SDI değeri, “geçirimsiz yüzeyler” ve “diğer” (geçirgen yüzey) sınıfları arasındaki spektral ayrılabilirliği göstermektedir. SDI değerlerinin hesaplanmasında gerekli olan sınıf ortalama değerleri ve standart sapmalar ArcGIS 10.3’te “Zonal Statistics” aracı ile hesaplanmıştır

$$SDI = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (1)$$

İndekslerin doğruluğunu ve geçirimsiz yüzey alanlarını çıkarma yeteneklerini belirlemek için, “geçirimsiz yüzeyler” sınıfına ait 525 ve “diğer” sınıfına ait 502 adet referans noktası, GEP üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden tabakalı rastgele örnekleme (stratified random sampling) yöntemi kullanılarak tüm çalışma alanına dağılacak şekilde toplanmıştır. GEP’de kml formatında kaydedilen noktalar ArcGIS 10.3’te açılarak “Extract Values to Points” aracı ile indeks haritalarıyla karşılaştırılmış ve “geçirimsiz yüzeyler” ve “diğer” sınıflarına isabet eden referans noktalarının sayıları belirlenerek Excel programında hata matrisi oluşturulmuştur.

Hata matrisi, referans verilerinin sınıflandırma sonuçlarıyla karşılaştırılmasına dayalıdır ve satırlar ve sütunlar halinde düzenlenmiş bir kare sayı dizisi şeklinde ifade edilir. Satır ve sütunlardan biri referans verilerini ve diğeri sınıflandırma verilerini temsil edecek şekilde düzenlenir (Foody, 2002; Stehman, 2013). Bu kapsamda genellikle sütunlar referans, satırlar ise sınıflandırma verilerini gösterecek şekilde hata matrisi oluşturulur (Şekil 3).

		j = Sütunlar (Referans)			Satır toplamı n _{i+}
		1	2	k	
i = Satırlar (Sınıflandırma)	1	n ₁₁	n ₁₂	n _{1k}	n ₁₊
	2	n ₂₁	n ₂₂	n _{2k}	n ₂₊
	k	n _{k1}	n _{k2}	n _{kk}	n _{k+}
Sütun toplamı n _{+j}		n ₊₁	n ₊₂	n _{+k}	n

Şekil 3- Hata matrisinin gösterimi
Figure 3- Representative error matrix

Şekil 3’te n adet referans noktası k² adet hücreye dağılmaktadır. Sütunlar (k adet) referans, satırlar (k adet) sınıflandırma verilerini gösterecek şekilde her referans noktası sınıflandırılmış k kategoriden ve referans veri setindeki aynı k kategoriden birine atanır. Hata matrisinde n_{ij}, i. kategoriye (i = 1, 2, ..., k) sınıflandırılmış ve referans veri setinde j. kategoride (j = 1, 2, ..., k) olan referans noktası sayısını gösterir (Congalton & Green, 2019). Hata matrisinin ana köşegeni doğru sınıflandırmaları vurgularken köşegen dışı ögeler sütunlarda ihmal ve satırlarda dâhil etme hatalarını gösterir (Olofsson, Foody, Herold, Stehman, Woodcock, & Wulder, 2014). Hata matrisinden üretici doğruluğu (Producer’s Accuracy-PA) kullanıcı doğruluğu (User’s Accuracy-UA), toplam doğruluk (Overall Accuracy-OA) ve kapa (κ) değerlerinin hesabı sırasıyla Denklem 2, 3, 4 ve 5’te gösterilmektedir. Bir sınıf için PA, o sınıf için doğru sınıflandırılmış piksel sayısının referans piksellerinin sayısına bölünmesiyle hesaplanır ve referans piksellerinin ne kadar doğru sınıflandırıldığını gösterir. PA değerinin 1’den farkı ihmal hatasıdır (eksik tahmin). Bir sınıf için UA, o sınıf için doğru sınıflandırılmış piksel sayısının sınıfa atanan piksellerin toplamına bölünmesiyle hesaplanır ve atanan piksellerin o sınıfı gerçekte temsil etme doğruluğunu gösterir. UA değerinin 1’den farkı dâhil etme hatasıdır (fazla tahmin). OA değeri doğru sınıflandırılmış piksel yüzdesini ifade eder (Navulur, 2006; Olofsson, Foody, Herold, Stehman, Woodcock, & Wulder, 2014; Congalton & Green, 2019). PA, UA ve OA için net bir sınırlama olmayıp her çalışmanın amacına göre doğruluk beklentisi değişmekle birlikte genel olarak % 70’in üzerinde doğruluk başarılı olarak kabul edilmektedir (Friedl, Sulla-Menashe, Tan, Schneider, Ramankutty, Sibley, & Huang, 2010; Roth, Roberts, Dennison, Alonzo, Peterson, & Beland, 2015). κ’nın olası değer aralığı -1/(k-1) ila 1 arasındadır (k, sınıf sayısı olup 1’den daha büyük bir tam sayıdır) ancak genellikle 0–1 arasında değerler alır. Negatif κ değerleri kötü uyumu gösterir (Feizizadeh, Darabi, Blaschke, & Lakes, 2022). Altman’ın (1999) κ indeks ölçeceğine göre değer 0,20’den düşük ise çok zayıf uyum, 0,21–0,40 aralığında ise zayıf uyum, 0,41–0,60 aralığında ise orta derecede uyum, 0,61–0,80 aralığında ise iyi uyum, 0,81–1,00 aralığında ise güçlü (mükemmel) uyum söz konusudur. κ değeri arttıkça uyum derecesi artar (Feizizadeh, Darabi, Blaschke, & Lakes, 2022).

$$PA = \frac{n_{ij}}{n_{+j}}, \quad (i = j) \quad (2)$$

$$UA = \frac{n_{ij}}{n_{i+}}, \quad (i = j) \quad (3)$$

$$OA = \frac{\sum_{i=j=1}^k n_{ij}}{n}, \quad (i = j) \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{n \sum_{i=j=1}^k n_{ij} - \sum_{i=j=1}^k (n_i + n_j)}{n^2 - \sum_{i=j=1}^k (n_i + n_j)} \quad (5)$$

4. BULGULAR

Samsun'a ait 07/07/2022 tarihli Sentinel-2A MSI ve 10/06/2022 tarihli Landsat-9 OLI-2 görüntüleri kullanılarak UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI geçirimli yüzey indeksleri uygulanmış, SDI ve hata matrisi yaklaşımlarıyla doğruluk değerlendirmeleri yapılarak sonuçların performansları belirlenmiştir.

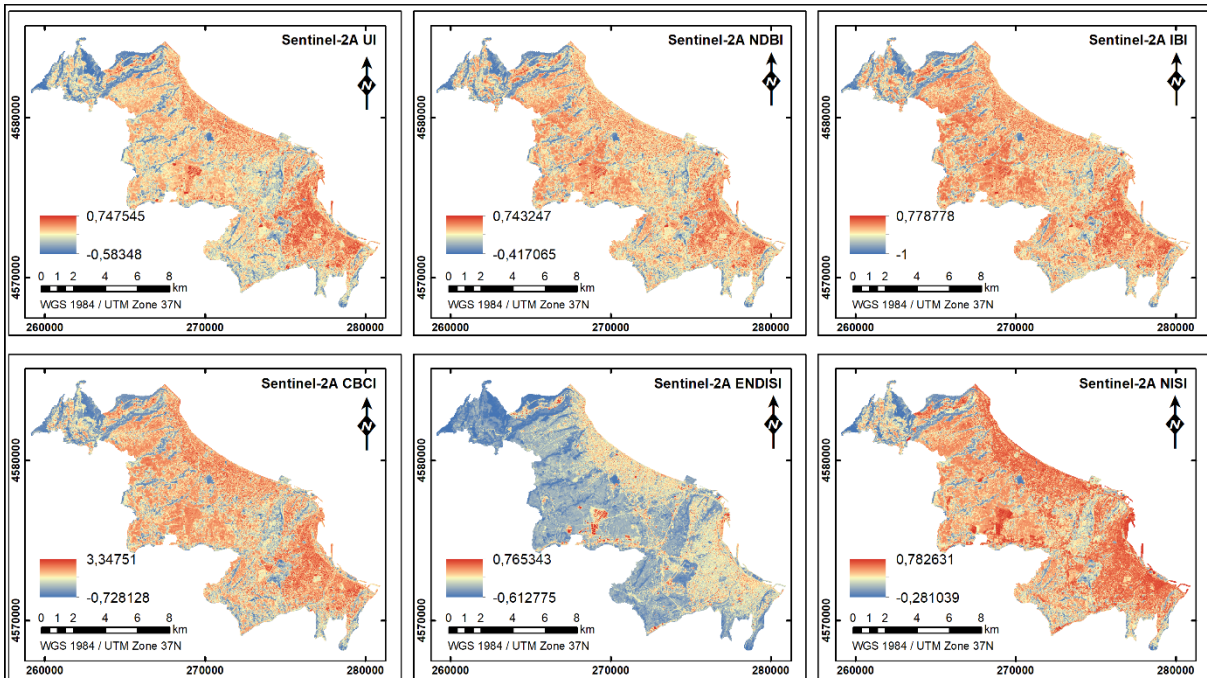
4.1. Geçirimli Yüzey İndeks Sonuçları

Çalışmada kullanılan Landsat-9 OLI-2 Level-2 görüntüleri radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltmeleri tamamlanmış ve analize hazır görüntüler olduğundan geçirimli yüzey indeksleri doğrudan uygulanmıştır. Sentinel-2A MSI Level 1-C görüntüleri ise sadece radyometrik kalibrasyon işleminden geçmiş olduğu için indeks analizlerinden önce Sen2Cor (bkz. 3.1. Veri ve Ön İşleme) ile atmosferik düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm veriler analize hazır hale geldiğinde çalışma alanı sınırlarına göre kesilmiş ve indeks bağıntılarına göre raster veriler üzerinde aritmetik işlemlerle geçirimli yüzey indeks değerleri

belirlenmiştir. Şekil 4 ve 5'te sırasıyla Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntülerinden elde edilen UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI indeks sonuçları görülmektedir.

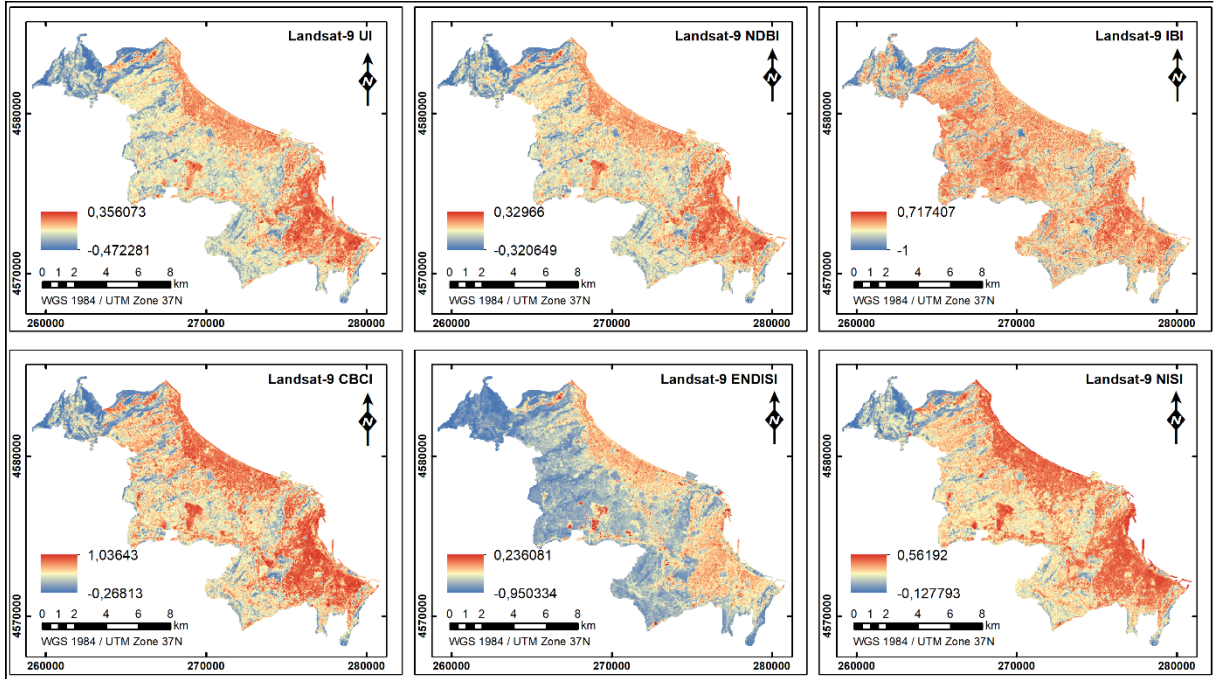
Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntülerinde her indeks analiz sonucu (Şekil 4 ve 5) için "3.2. Spektral İndekslerden Geçirimli Yüzeylerin Belirlenmesi" bölümünde belirtildiği şekilde GEP üzerinden yüksek çözünürlüklü görüntülerden yararlanarak belirlenen örneklem pikseller yardımıyla dinamik olarak eşik değerler belirlenmiş ve indeks görüntülerinde "geçirimli yüzeyler" ve "diğer" olmak üzere iki sınıflı tematik haritalar üretilmiştir (Şekil 6 ve 7). Geçirimli yüzeyler binalar, otoparklar, yollar, kaldırımlar vb. yapay yüzeyleri, diğer alanlar ise çıplak toprak, kurak arazi, ormanlık alan, otlaklar vb. doğal yüzeyleri kapsamaktadır.

Sınıflandırılmış indeks sonuçlarına göre belirlenen "geçirimli yüzeyler" ve "diğer" alanların yüzölçümleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tablo 3'e göre toplam 127,2 km²'lik çalışma alanında geçirimli yüzey alanlarının yüzölçümü Sentinel-2A MSI uydu görüntüsünden elde edilen sonuçlara göre 19,3 km² ile 42,8 km² arasında, Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüsünden elde edilen sonuçlara göre 32,6 km² ile 48,1 km² arasında değişmektedir.

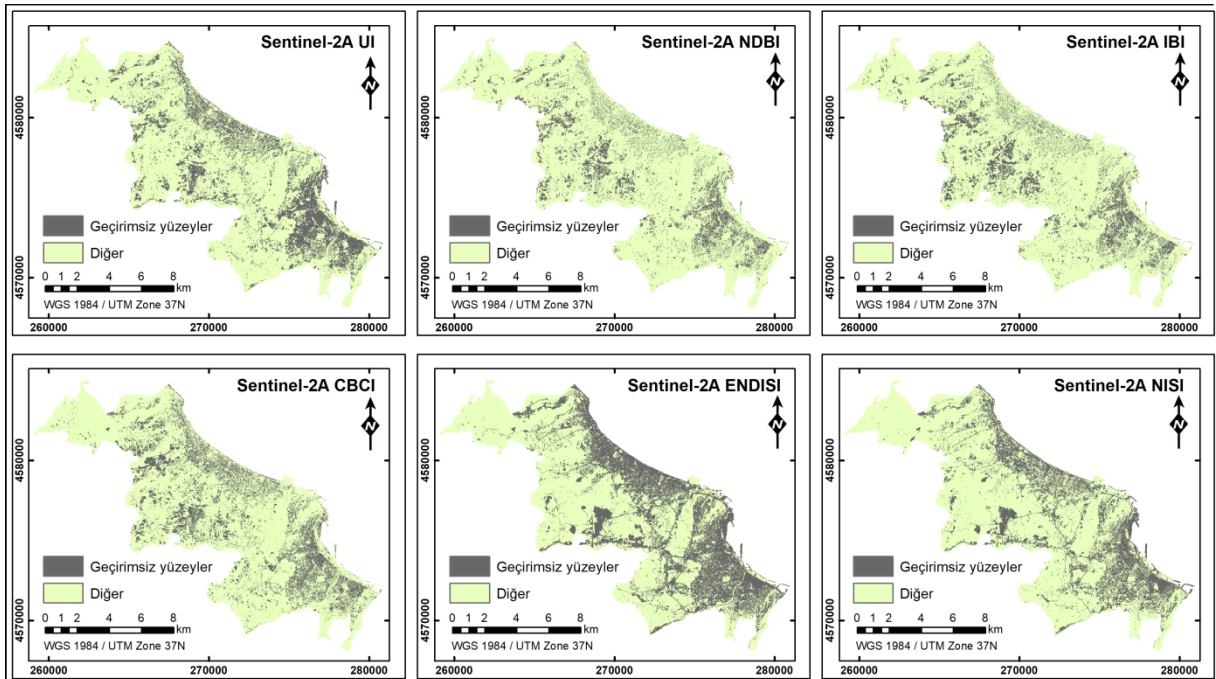


Şekil 4- Sentinel-2A MSI indeks sonuçları

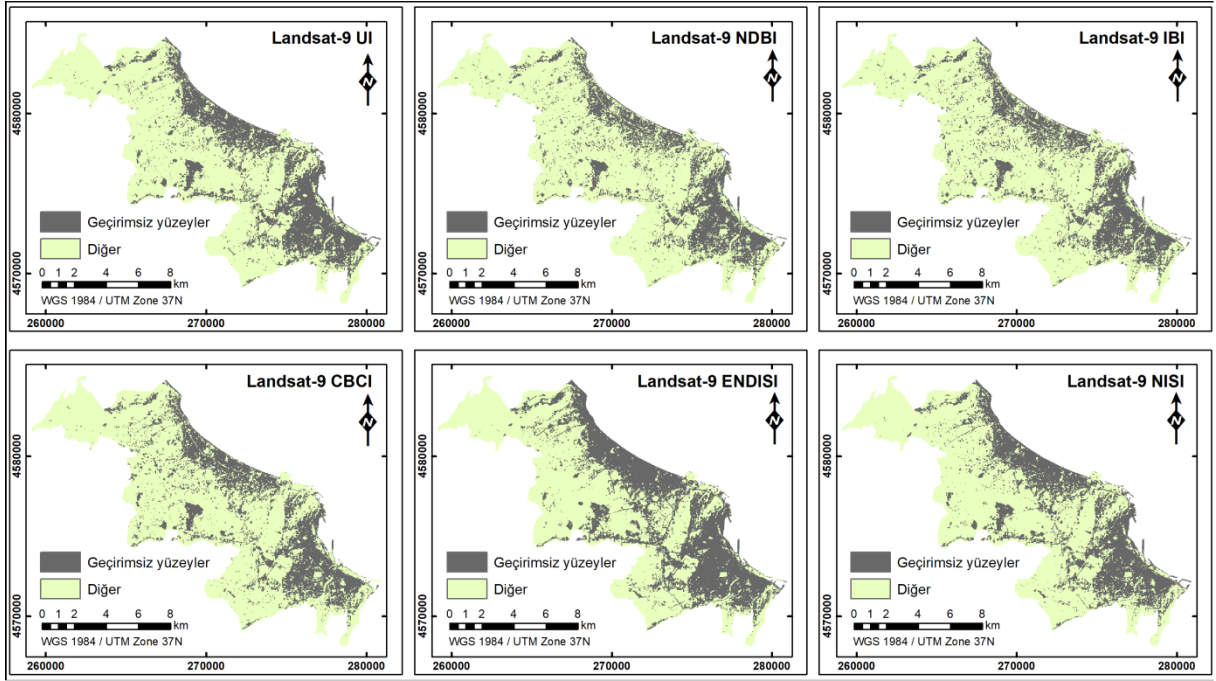
Figure 4- Sentinel-2A MSI indices results



Şekil 5- Landsat-9 OLI-2 indeks sonuçları
Figure 5- Landsat-9 OLI-2 indices results



Şekil 6- Sentinel-2A MSI sınıflandırılmış indeks sonuçları
Figure 6- Sentinel-2A MSI classified indices results



Şekil 7- Landsat-9 OLI-2 sınıflandırılmış indeks sonuçları
Figure 7- Landsat-9 OLI-2 classified indices results

Tablo 3- Geçirimsiz yüzey indeks sonuçlarına göre yüzölçümü değerleri
Table 3- Surface area values from impervious surface indices results

İndeks	Özellik	Alan (km ²)	
		Sentinel-2A MSI	Landsat-9 OLI-2
UI	Geçirimsiz yüzeyler	29,2	38,9
	Diğer	98,0	88,3
NDBI	Geçirimsiz yüzeyler	19,3	32,6
	Diğer	107,9	94,6
IBI	Geçirimsiz yüzeyler	21,4	34,0
	Diğer	105,8	93,2
CBCI	Geçirimsiz yüzeyler	26,1	35,3
	Diğer	101,1	91,9
NISI	Geçirimsiz yüzeyler	30,2	39,6
	Diğer	97,0	87,6
ENDISI	Geçirimsiz yüzeyler	42,8	48,1
	Diğer	84,4	79,1

4.2. İndekslerin Performans Değerlendirmesi

Geçirimsiz yüzey indekslerinin performans değerlendirmesi için tematik haritalarda iki sınıf (geçirimsiz yüzeyler ve diğer) arasındaki SDI değerleri (Tablo 4) ve hata matrisinden PA, UA, OA ve κ değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4'te yer alan SDI değerleri geçirimsiz yüzey alanları ve diğer alanlar arasındaki spektral ayrımın başarısını göstermektedir. Tablo 4 incelendiğinde SDI değerlerinin Sentinel-2A MSI için 1,2143–1,4554, Landsat-9 OLI-2 için 1,3748–1,6516 aralığında yer aldığı belirlenmiştir. Hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntüsü için tüm indeksler 1–3 aralığında olup SDI ölçeğine göre tümü

için iyi spektral ayırım söz konusudur. Bununla birlikte, altı adet geçirimsiz yüzey indeksi arasında ENDISI indeksinin hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntülerinde geçirimsiz yüzeyler ve geçirgen yüzeyler arasında diğer indekslere kıyasla çok daha yüksek bir spektral ayrılabilirlik derecesine sahip olduğu görülmektedir. SDI değeri Sentinel-2A MSI için 1,4554, Landsat-9 OLI-2 için 1,6516 olarak hesaplanmıştır.

Geçirimsiz yüzeyler için 525 ve diğer kategorisi için 502 referans noktası kullanılarak oluşturulan hata matrisinden (Tablo 5) geçirimsiz yüzeyler ve diğer sınıfları için hesaplanan PA değerleri referans noktalarının sınıflandırma doğruluklarını, UA değerleri ise oluşturulan sınıfların gerçekte o sınıfları

temsil etme doğruluklarını göstermektedir. OA değerleri her iki sınıf için toplam olarak referans noktalarının sınıflandırma doğruluğunu ortaya koyarken κ değeriyle PA ve UA entegre edilerek sınıflandırma doğruluğu belirlenmiştir. Tablo 5'te hata matrisinde sütunlar referans, satırlar sınıflandırma verilerini göstermektedir.

Tablo 5 incelendiğinde PA, UA ve OA değerlerinin % 70'in üzerinde olduğu indeksler Sentinel-2A MSI için ENDISI ve NISI, Landsat-9 OLI-2 için yalnızca ENDISI'dir. ENDISI indeksi hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde en yüksek doğruluğa sahiptir. Sentinel-2A MSI için OA % 91,53 ve κ 0,8301 iken Landsat-9 OLI-2 için OA % 78,29 ve κ 0,5646'dır. Sentinel-2A MSI için en başarısız indeks OA % 49,66 ve κ 0,0038 ile IBI indeksiyken, Landsat-9 OLI-2 için OA % 71,08 ve κ 0,4247 ile NDBI indeksidir. Landsat-9 OLI-2 için tüm indekslerde OA değerleri % 70'in üzerindedir. κ değerleri 0,41–0,60 aralığında olup κ ölçeğine göre orta derecede uyum söz konusudur. Sentinel-2A MSI için ise OA % 70'in üzerinde olan yalnızca ENDISI ve NISI indeksleridir. OA değeri ENDISI'de % 90'ın ve NISI'de % 80'in üzerindedir. NISI indeksinin ENDISI

indeksinden sonra en yüksek doğruluğa sahip olduğu ve yeterli performans gösterdiği görülmektedir. κ değeri 0,61–0,80 aralığında yer alan NISI indeksi iyi uyum, 0,81–1,00 aralığında yer alan ENDISI ise güçlü (mükemmel) uyum göstermiştir.

Sentinel-2A MSI için UI, NDBI, IBI ve CBCI indeksleri 1'den daha büyük SDI değerleriyle spektral ayrılabilirlik açısından yeterli olsa da OA ve κ değerleri yönünden başarısız sonuç vermiştir. Bu indekslerin OA değerleri % 70'in ve κ değerleri 0,40'ın altında kalmıştır. Landsat-9 OLI-2 için Sentinel-2 MSI'den farklı olarak tüm indeksler için 1'den daha büyük SDI değerlerinin yanı sıra OA değerleri % 70'in ve κ değerleri 0,40'ın üzerindedir. Ancak burada da geçirimsiz yüzey sınıfı için PA değerleri ENDISI dışındaki indekslerde % 70'in altında kalmıştır. PA, UA, OA ve κ açısından toplam değerlendirmeler sonucunda Sentinel-2A MSI için ENDISI ve ardından NISI, Landsat-9 OLI-2 için ENDISI yeterli doğruluk göstermiştir. Ayrıca OA ve κ açısından Sentinel-2A MSI görüntüsünden elde edilen ENDISI ve NISI doğruluklarının Landsat-9 OLI-2'den elde edilen ENDISI doğruluğundan yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4- SDI değerleri
 Table 4- SDI values

	İndeks	Özellik	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	SDI	
Sentinel-2A MSI	UI	Geçirimsiz yüzey	-0,0064	0,6488	0,0632	0,0636	1,2244	
		Diğer	-0,5835	-0,0064	-0,1785	0,1338		
	NDBI	Geçirimsiz yüzey	0,0916	0,7432	0,1330	0,0416	1,2341	
		Diğer	-0,4171	0,0916	-0,0475	0,1046		
	IBI	Geçirimsiz yüzey	-0,0888	0,7788	-0,0306	0,0546	1,2143	
		Diğer	-1,0000	-0,0888	-0,3046	0,1710		
	CBCI	Geçirimsiz yüzey	0,5615	3,3475	0,6537	0,0934	1,2157	
		Diğer	-0,7281	0,5615	0,2000	0,2798		
	NISI	Geçirimsiz yüzey	0,3555	0,7826	0,4046	0,0347	1,3073	
		Diğer	-0,2810	0,3555	0,1757	0,1404		
	ENDISI	Geçirimsiz yüzey	-0,2939	0,7549	-0,1564	0,1119	1,4554	
		Diğer	-0,6128	-0,2939	-0,4265	0,0737		
	Landsat-9 OLI-2	UI	Geçirimsiz yüzey	-0,1072	0,3561	-0,0387	0,0476	1,5152
			Diğer	-0,4723	-0,1072	-0,2285	0,0777	
NDBI		Geçirimsiz yüzey	-0,0208	0,3297	0,0202	0,0329	1,4089	
		Diğer	-0,3206	-0,0208	-0,1150	0,0630		
IBI		Geçirimsiz yüzey	0,0069	0,7174	0,1165	0,0846	1,3748	
		Diğer	-1,0000	0,0069	-0,2739	0,1993		
CBCI		Geçirimsiz yüzey	0,4062	1,0364	0,4868	0,0511	1,5349	
		Diğer	-0,2681	0,4062	0,1896	0,1425		
NISI		Geçirimsiz yüzey	0,3312	0,5619	0,3816	0,0304	1,4928	
		Diğer	-0,1278	0,3312	0,2266	0,0734		
ENDISI		Geçirimsiz yüzey	-0,3176	0,2361	-0,2476	0,0472	1,6516	
		Diğer	-0,9503	-0,3176	-0,3843	0,0356		

Tablo 5- Hata matrisi
Table 5- Error matrix

Sentinel-2A MSI					Landsat-9 OLI-2				
UI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	UI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	249	88	337	% 73,89	Geçirimsiz	351	88	439	% 79,95
Diğer	276	414	690	% 60,00	Diğer	174	414	588	% 70,41
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 47,43	% 82,47			PA	% 66,86	% 82,47		
		OA=% 64,56	κ=0,2966				OA=% 74,49	κ=0,4914	
NDBI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	NDBI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	129	102	231	% 55,84	Geçirimsiz	309	81	390	% 79,23
Diğer	396	400	796	% 50,25	Diğer	216	421	637	% 66,09
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 24,57	% 79,68			PA	% 58,86	% 83,86		
		OA=% 51,51	κ=0,0420				OA=% 71,08	κ=0,4247	
IBI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	IBI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	139	131	270	% 51,48	Geçirimsiz	317	85	402	% 78,86
Diğer	386	371	757	% 49,01	Diğer	208	417	625	% 66,72
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 26,48	% 73,90			PA	% 60,38	% 83,07		
		OA=% 49,66	κ=0,0038				OA=% 71,47	κ=0,4322	
CBCI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	CBCI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	271	191	462	% 58,66	Geçirimsiz	333	100	433	% 76,91
Diğer	254	311	565	% 55,04	Diğer	192	402	594	% 67,68
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 51,62	% 61,95			PA	% 63,43	% 80,08		
		OA=% 56,67	κ=0,1353				OA=% 71,57	κ=0,4333	
ENDISI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	ENDISI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	509	71	580	% 87,76	Geçirimsiz	438	136	574	% 76,31
Diğer	16	431	447	% 96,42	Diğer	87	366	453	% 80,79
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 96,95	% 85,86			PA	% 83,43	% 72,91		
		OA=% 91,53	κ=0,8301				OA=% 78,29	κ=0,5646	
NISI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA	NISI	Geçirimsiz	Diğer	Satır Σ	UA
Geçirimsiz	388	49	437	% 88,79	Geçirimsiz	361	100	461	% 78,31
Diğer	137	453	590	% 76,78	Diğer	164	402	566	% 71,02
Sütun Σ	525	502	1027		Sütun Σ	525	502	1027	
PA	% 73,90	% 90,24			PA	% 68,76	% 80,08		
		OA=% 81,88	κ=0,6390				OA=% 74,29	κ=0,4871	

Sonuç olarak; spektral ayrılabilirlik ve hata matrisi ile yapılan kantitatif değerlendirmeler doğrultusunda çalışma alanında ENDISI indeksinin hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntülerinden geçirimsiz yüzey çıkarımında etkili indeks olduğu görülmektedir. SDI değerleri açısından Landsat-9 OLI-2 Sentinel-2A MSI görüntüsünden daha yüksek olsa da hata matrisi ile Sentinel-2A MSI'nin Landsat-9 OLI-2'den daha yüksek doğruluk gösterdiği belirlenmiştir. Buna göre sadece SDI değerleri üzerinden değerlendirme yapmanın eksik olacağı ve SDI değerleri açısından karşılaştırmanın farklı görüntüler arasında değil bir görüntüde farklı indekslerin karşılaştırılması açısından uygun olacağı anlaşılmaktadır.

Geçirimsiz yüzey çıkarımında uydu görüntüsü ve indekslerin sonuçlara etkilerini daha iyi

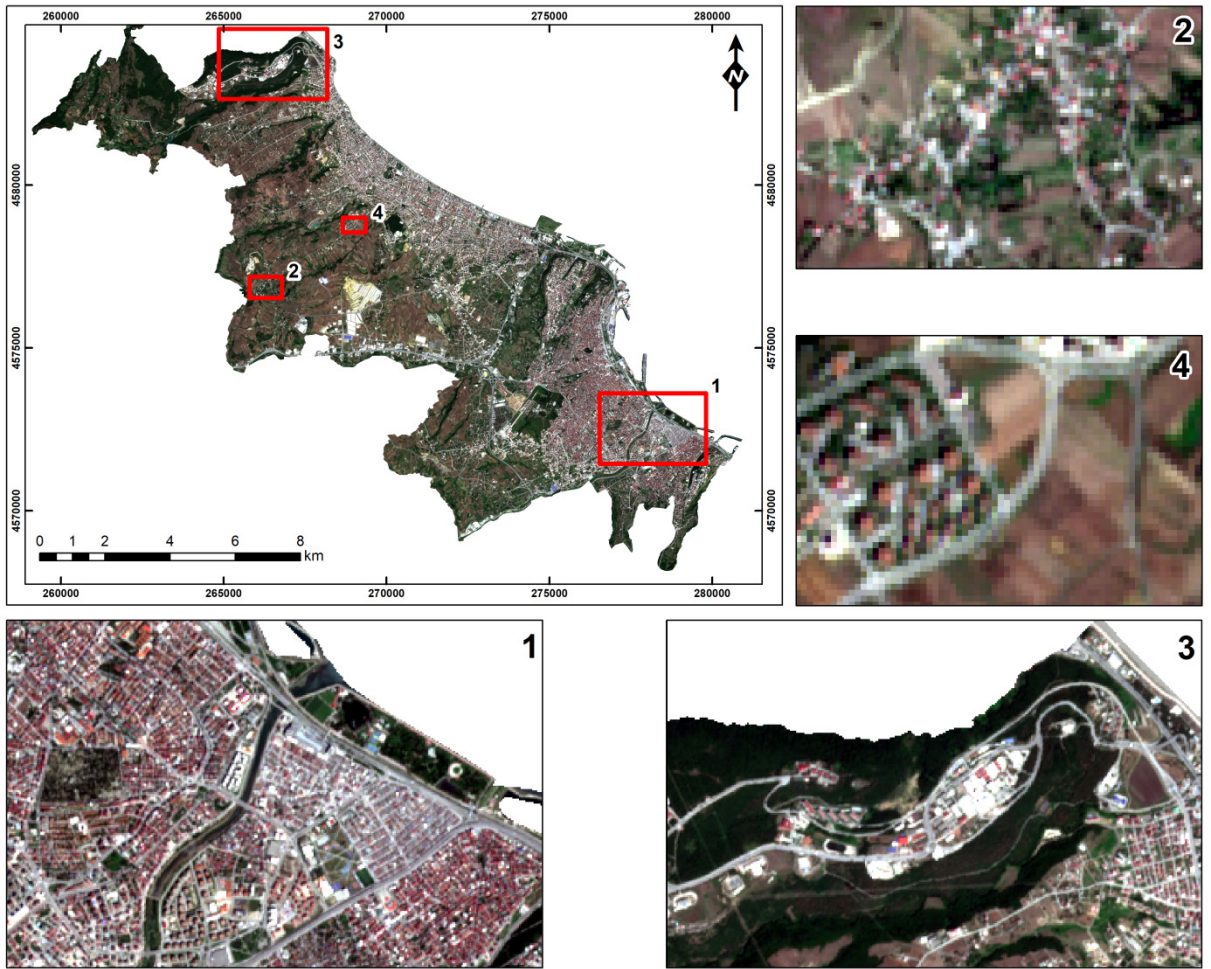
gözlemlemek ve aralarındaki farkları daha iyi yorumlamak için kantitatif değerlendirmelere ek olarak, geçirimsiz yüzeylerden (1) yüksek yoğunluklu yerleşim alanı, (2) düşük yoğunluklu yerleşim alanı, (3) yollar ve (4) çıplak toprak alanı (geçirimsiz yüzeylerle benzer yansıtım gösterdiği için) olmak üzere dört alt kümede görsel olarak inceleme yapılmıştır (Şekil 8). Tüm indeks sonuçları GEP üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntülerle görsel olarak karşılaştırılmıştır.

Yüksek yoğunluklu yerleşim alanlarında Sentinel-2A MSI görüntülerinde NDBI ve IBI indeksleriyle çıkarılan geçirimsiz yüzey alanları genel olarak daha parçalı bir görünüme sahiptir. NDBI ve IBI indeksleri binaların çıkarımında diğer indekslere göre daha zayıf kalmış ve birçok yapı tanımlanamamıştır. CBCI ve UI sonuçları ve NDBI ve

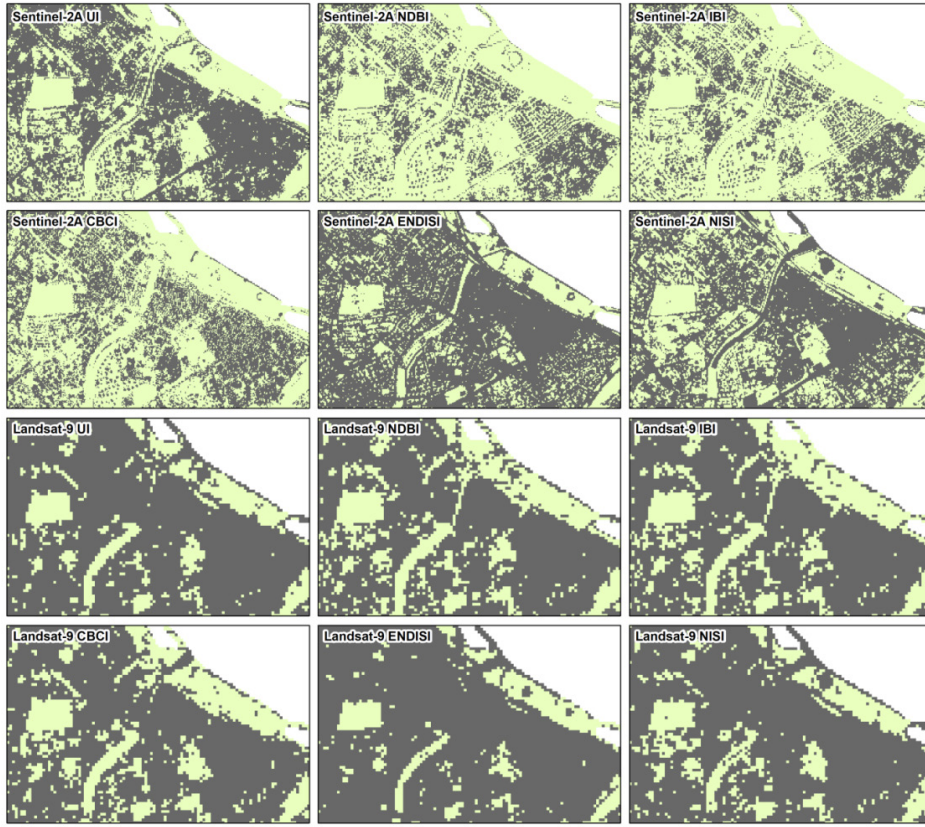
IBI indekslerine göre daha iyi olsa da sonuçlar birçok yapının eksik çıkarıldığını göstermiştir. NISI ve ENDISI indeksleri ise daha başarılı sonuçlar vermiştir. Landsat-9 OLI-2 görüntülerinden yüksek yoğunluklu yerleşim alanlarındaki geçirimsiz yüzey bilgilerinin çıkarımında ise tüm indeksler genel olarak başarılı sonuç vermiştir ancak Sentinel-2A MSI'ya göre daha düşük mekânsal çözünürlüğe sahip olmasından dolayı yerleşim dışı birçok pikselin de geçirimsiz yüzey olarak sınıflandırıldığı görülmüştür. Bitki örtüsüyle kaplı birkaç alan dışında hemen hemen tüm pikseller geçirimsiz yüzey olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 9).

Düşük yoğunluklu yerleşim alanlarında da yüksek yoğunluklu yerleşim alanlarında olduğu gibi

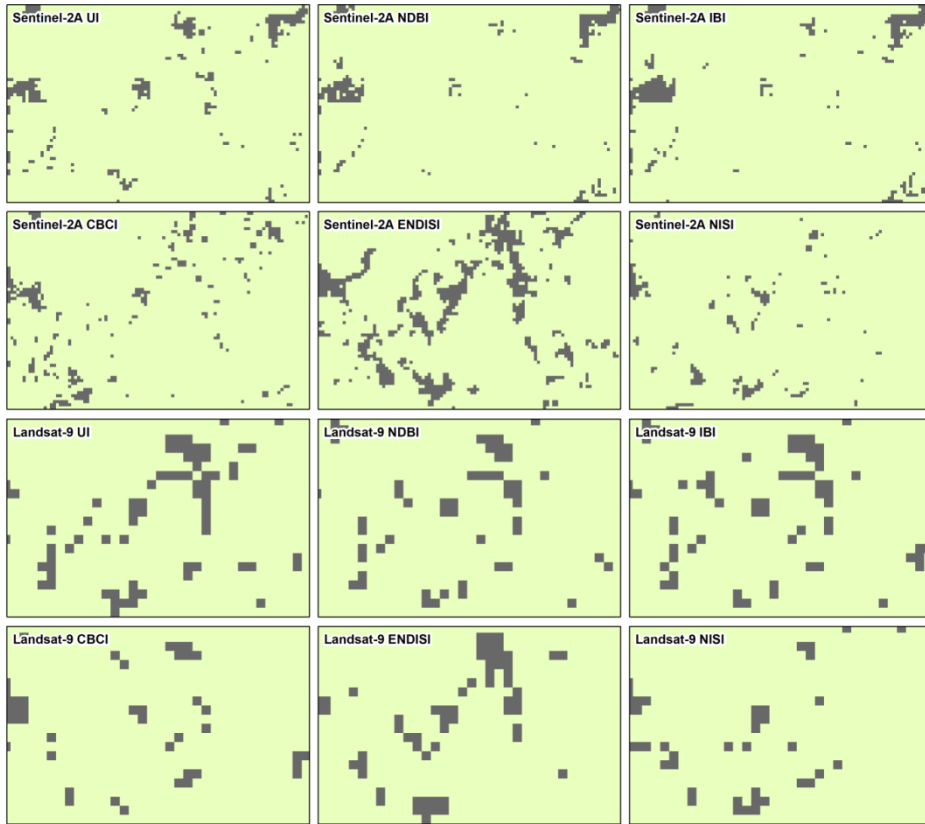
Sentinel-2A MSI görüntülerinde NDBI ve IBI başarısız sonuç vermiş ve birçok yapı tanımlanamamıştır. CBCI ve UI indeksleri NDBI ve IBI'den daha iyi sonuç verirken en başarılı indeksler ENDISI ve NISI olmuştur. Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde tüm indeksler benzer sonuçlar vermiştir. Ancak bir pikselin tek bir sınıfla nitelenmesinden dolayı karışık piksel etkisiyle özellikle yüksek albedo geçirimsiz yüzeylerin bulunduğu alanlar geçirimsiz yüzey yüzölçümünün çok fazla artmasına neden olmuştur. Sentinel-2A MSI için ENDISI ve NISI Landsat-9 OLI-2'den daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olmasından dolayı düşük yoğunluklu yerleşim alanlarını daha gerçekçi bir şekilde yansıtabilmiştir (Şekil 10).



Şekil 8- Görsel denetleme alt bölgeleri
Figure 8- Sub-zones for visual inspection



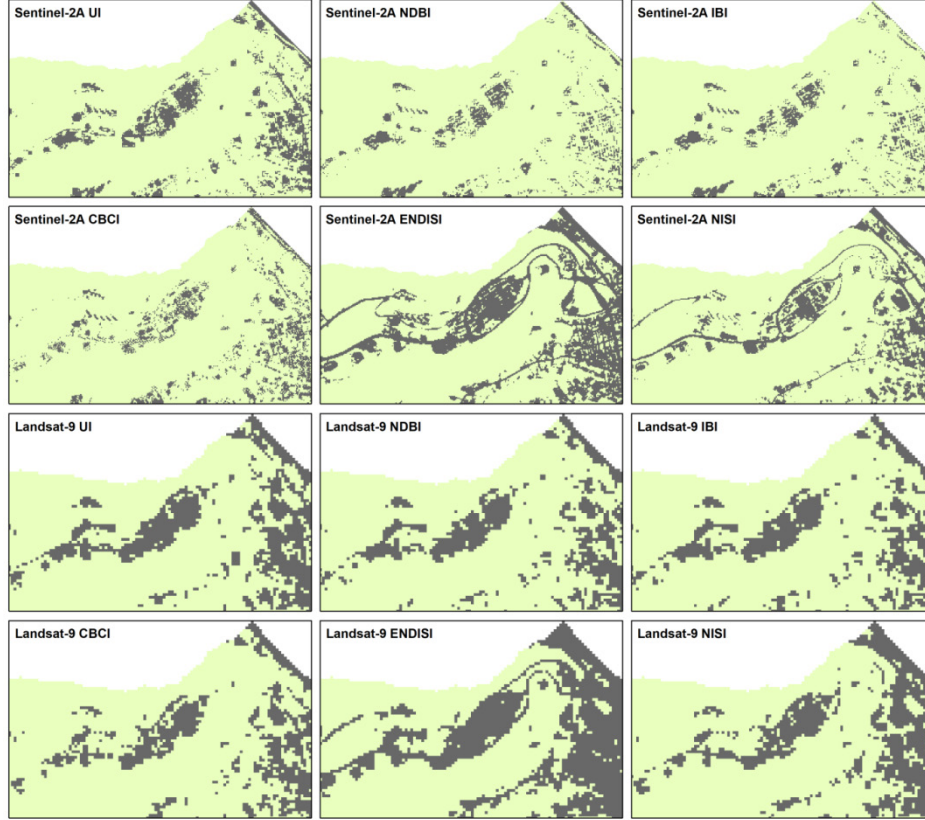
Şekil 9- Yüksek yoğunluklu yerleşim alanları örneğinde indekslerin karşılaştırılması
 Figure 9- Comparison of indices in the zone of high-density residential areas



Şekil 10- Düşük yoğunluklu yerleşim alanları örneğinde indekslerin karşılaştırılması
 Figure 10- Comparison of indices in the zone of low-density residential areas

Yol altyapıları, geçirimsiz yüzeylerin önemli bir bileşenidir ve yol çıkarım kalitesi, geçirimsiz yüzey çıkarımının doğruluğunu doğrudan gösterebilir (Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020). Yollar incelendiğinde, Sentinel-2A MSI için ENDISI ve NISI indeksleriyle yollar arka plandan iyi ayrılmış ve net olarak çıkarılabilmektedir ancak ENDISI NISI'den daha başarılı sonuç vermiştir. Diğer indeksler ise yolların çıkarımında başarısız olmuştur. Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde NDBI, IBI ve CBCI başarısız sonuç

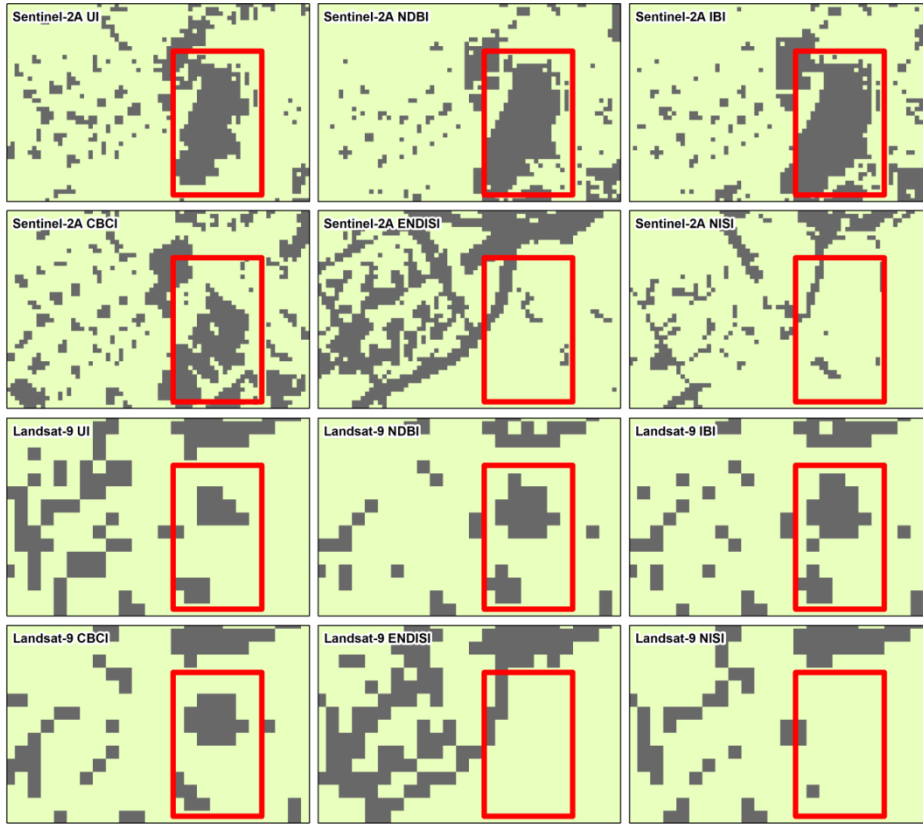
verirken UI ve NISI ile bazı yollar belirlenebilmiştir. ENDISI ise Landsat-9 OLI-2'de başarılı bir yol çıkarımı vermiştir. Her iki görüntüde en başarılı sonuç veren ENDISI indeksinin sonuçları karşılaştırıldığında Sentinel-2A MSI'nın Landsat-9 OLI-2 görüntüsünden daha yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle yolların çok daha net çıktığı ve ayrıntıların daha belirgin olduğu görülmüştür. Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde düşük mekânsal çözünürlük nedeniyle dar yollar belirlenememiştir (Şekil 11).



Şekil 11- Yol ağı örneğinde indekslerin karşılaştırılması
Figure 11- Comparison of indices in the zone of road network

Hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntülerinde UI, NDBI, IBI ve CBCI'nin geçirimsiz yüzeyler ile çıplak toprak alanları arasındaki ayırma başarısız olduğu ve birçok çıplak toprak alanının hatalı şekilde geçirimsiz yüzey olarak sınıflandırıldığı görülmüştür. Diğer indekslerle karşılaştırıldığında, çıplak toprak etkisini en iyi bastıran ENDISI ve NISI olmuş, geçirimsiz yüzeyler çıplak topraktan ve kurak

arazi alanlarından ayrılabilmiştir. ENDISI ve NISI indekslerinde az sayıda çıplak toprak alanının hatalı olarak geçirimsiz yüzey sınıfına atandığı belirlenmiştir. NISI indeksi ENDISI'den daha başarılı sonuç vermiştir. Şekil 12'den görülebileceği gibi, ENDISI ve NISI hariç diğer dört geçirimsiz yüzey indeksinin sonuçlarına karşılık gelen geniş bir çıplak toprak alanı vardır ve burada çıplak toprak geçirimsiz yüzey olarak yanlış sınıflandırılmıştır.



Şekil 12- Çıplak toprak örneğinde indekslerin karşılaştırılması

Figure 12- Comparison of indices in the zone of bare soil

5. TARTIŞMA

Spektral indeksler, geçirimsiz yüzeylerin çıkarımında yaygın olarak kullanılmasına rağmen hala bazı zorluklar ve sınırlamalar bulunmaktadır (Zhang, Tian, & Liu, 2020). Temel problem geçirimsiz yüzey çıkarımında her alanda en doğru sonucu verebilecek bir indeksin bulunmamasıdır. Bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalar geçirimsiz yüzey çıkarım doğruluğunun indeksler arasında farklılık gösterebileceği ve bir indeksin farklı uydu görüntüleri ve çalışma alanının özelliklerine bağlı olarak değişen performanslara sahip olabileceğini göstermiştir (Varshney & Rajesh, 2014; Fan, Fan, & Weng, 2015; Daramola, Eresanya, & Ishola, 2018; Bouhennache, Bouden, Taleb-Ahmed, & Cheddad, 2019; Xi, Thinh, & Li, 2019; Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Kebede, Hailu, & Suryabhadran, 2022).

Bu çalışma, farklı indekslerin farklı uydu görüntülerindeki performanslarının kantitatif analizlerle kapsamlı karşılaştırmaları ile geçirimsiz yüzey çıkarım konusunda literatüre katkıda bulunmaktadır. Sentinel-2 ve Landsat OLI-2 görüntülerinin indeks performanslarının karşılaştırıldığı çalışmalarda (Xi, Thinh, & Li, 2019; Deliry, Avdan, & Avdan, 2021), Sentinel-2 uydu görüntüsünün Landsat OLI-2 görüntülerine kıyasla

daha yüksek çözünürlüğe sahip olmasının geçirimsiz yüzey çıkarımında genel olarak daha yüksek doğruluk sağlayabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada da en yüksek performans gösteren ENDISI indeksinin Sentinel-2A MSI için doğruluğu Landsat-9 OLI-2'den daha yüksektir. Ancak daha düşük doğruluk gösteren UI, NDBI, IBI ve CBCI indekslerinde Sentinel-2A MSI sonuçlarının Landsat-9 OLI-2 sonuçlarından bir üstünlüğü oluşmamıştır. Bu durum karışık piksel problemi etkisi ve çalışma alanının özelliklerine bağlı olarak sonuçların değişebileceğini göstermektedir. Ancak her durumda çalışmada kullanılan Sentinel-2A MSI ve Landsat OLI-2 görüntülerinin orta çözünürlük düzeyinde görüntüler olması nedeniyle karışık piksel problemi etkisinin artmasının geçirimsiz yüzey çıkarım doğruluğunu olumsuz etkilediği ifade edilebilir. Hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 için en yüksek performansa sahip ENDISI indeksi sonucuna göre geçirimsiz yüzey alanları Sentinel-2A MSI ile 42,8 km², Landsat-9 OLI-2 ile 48,1 km² olarak belirlenmiştir. Bu durum piksel boyutunun artması nedeniyle yüksek albedo geçirimsiz yüzeylerin bulunduğu alanlarda karışık piksel etkisinin yüzölçüm değerlerini artırmasıyla açıklanabilir.

Bugüne kadar yapılan araştırmalar, karışık piksel probleminin yanı sıra çıplak toprağın ve kurak

arazilerin geçirimsiz yüzeylerle benzer yansıtım göstererek hatalı yorumlanabileceğini göstermiştir (Sun, Guo, Li, Lu, & Du, 2011; Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019). UI ve NDBI indeksinde çıplak toprağın geçirimsiz yüzey çıkarımındaki olumsuz etkilerini giderebilmek için oluşturulan IBI ve CBCI indeksinin ise geçirimsiz yüzey çıkarım doğruluğunun beklentileri karşılamadığı çeşitli araştırmalarda belirtilmektedir (Daramola, Eresanya, & Ishola, 2018; Zhang, Tian, & Liu, 2020). Bu çalışmada da benzer şekilde UI, NDBI, IBI ve CBCI indeksleri yeterli performans göstermemiştir. Çalışmanın bulguları ENDISI ve NISI indekslerinin çıplak toprak ve kurak arazi yüzeylerinin geçirimsiz yüzey çıkarımına etkilerinin daha az olduğunun belirlendiği ve daha başarılı sonuç alındığını gösteren çalışmalarla (Chen, Yang, Chen, Yang, Zhang, & He, 2019; Chen, Chen, Yang, He, Hou, & Shi, 2020; Dixit, Chaurasia, Mishra, Singh, & Lee, 2022; Su, Tian, Dong, Tian, Wang, & Xi, 2022) uyumlu olacak şekilde sonuç vermiş ancak bu etkinin tamamen yok olmadığını göstermiştir. Bu nedenle geçirimsiz yüzeylerin çıplak toprak ve kurak arazi ile ayırımının daha iyi yapılması için daha fazla araştırma gerekmektedir. Son yıllarda çıplak toprak ve kurak arazi alanlarının belirlenmesi için çeşitli indeksler (Deng, Wu, Li, & Chen, 2015; Nguyen, Chidthaisong, Kieu Diem, & Huo, 2021; Liu, Meng, Zhang, & Wu, 2022) yayınlanmıştır. Bu kapsamda çıplak toprak ve kurak arazi etkilerinin azaltılması amacıyla bu indekslerin geçirimsiz yüzey çıkarımından önce uygulanarak alandan maskelenmesi veya geçirimsiz yüzey indeks bağıntılarıyla birleştirilmesi sağlanabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geçirimsiz yüzeylerin mekânsal dağılımı ve zamansal dinamikleri, ekosistem servislerinde ve küresel çevre değişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, kentsel alanların mekânsal dağılımının izlenmesi ve değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Nesne özelliklerinin hızlı ve ekonomik bir şekilde çıkarılmasını sağlayan uzaktan algılama teknolojisi kentsel geçirimsiz yüzeylerin izlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda uydu görüntülerinden spektral indekslerin kullanımıyla geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesi kolay uygulanabilirliği nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Uzaktan algılama teknolojisi alanında ilerlemeler, uydu görüntülerini kullanarak geçirimsiz yüzeylerin sınıflandırılması için çeşitli spektral indekslerin geliştirilmesini yaygınlaştırmış ve çeşitli araştırmacılar tarafından çok sayıda indeks tanımlanmıştır. Bununla birlikte, kentsel alanların mekânsal heterojenliği ve bazı geçirimsiz yüzey malzemeleri ve diğer arazi örtüsü türleri arasındaki

benzer spektral tepkiler nedeniyle uydu görüntülerinden geçirimsiz yüzeylerin doğru şekilde çıkarılmasında bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle farklı indekslerin kullanımı ve doğruluk değerlendirmesiyle çalışma alanı için optimum indeks seçimi önemlidir.

Bu çalışmada Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 uydu görüntülerinden Samsun'da UI, NDBI, IBI, CBCI, ENDISI ve NISI olmak üzere altı farklı spektral indeks kullanılarak geçirimsiz yüzey alanları belirlenmiş ve sonuç doğrulukları spektral ayrılabilirlik ve hata matrisi yaklaşımları ile kantitatif olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca görüntü üzerinden görsel denetimler ile indeks etkileri irdelenmiştir. Geçirimsiz yüzeylerin ayırt edilmesi konusunda ENDISI, istatistiksel ve görsel olarak altı indeks içinde en iyi genel performansa sahiptir ve farklı uydu görüntülerinin kullanımından etkilenmemiştir. ENDISI hem Sentinel-2A MSI hem de Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde diğer indekslere kıyasla daha yüksek spektral ayrılabilirlik ve sınıflandırma doğruluğu göstermiştir. Görsel denetimler de ENDISI indeksiyle hem yüksek yoğunluklu yerleşim alanlarında bina kümelerinin hem düşük yoğunluklu yerleşim alanlarında tekil bina çıkarımının başarılı olduğu, yolların net olarak tanımlanabildiği ve çıplak toprağın geçirimsiz yüzeylerden iyi ayırt edilebildiğini ortaya koymuştur. Çalışmada görüntü çözünürlüğünün sonuç doğruluğunu etkilediği görülmüştür. Genel değerlendirme bazında en iyi performansa sahip ENDISI indeksinin daha yüksek çözünürlüklü görüntü olan Sentinel-2A MSI için OA değeri % 91,53 ve κ değeri 0,8301 iken Landsat-9 OLI-2'de OA değeri % 78,29 ve κ değeri 0,5646'dır. Bu durum daha yüksek çözünürlüklü görüntülerin kullanılabilmesi durumunda doğrulukların daha da artabileceğini ortaya koymaktadır. Sentinel-2A MSI görüntüsünde ENDISI indeksinden sonra en iyi performans NISI indeksi ile elde edilmiştir. Landsat-9 OLI-2 görüntüsünde ise ENDISI'den sonra UI ve NISI en iyi sonucu vermiştir. NISI çıplak toprağın geçirimsiz yüzey çıkarımı üzerindeki etkilerini ENDISI indeksinden daha iyi bastrabilmiştir.

Sonuç olarak; geçirimsiz yüzeylerin sınıflandırılması, özellikle görüntüler heterojen arazi örtüsü türleri içerdiğinde zorlaşsa da yine de spektral indeksler yöntemiyle geçirimsiz yüzey çıkarımı ve mekânsal değişim tespiti, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında hızlı ve maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Bu bağlamda, farklı çalışma alanlarında alternatif uydu görüntülerinden farklı indekslerin kullanımıyla optimum indeks seçilerek geçirimsiz yüzey çıkarım doğruluğu artırılabilir. Bununla birlikte uydu verilerinin kullanımı özellikle tarihsel arşiv verilere erişim sayesinde değişim

belirleme çalışmalarını kolaylaştıracaktır. Dolayısıyla çok zamanlı veri kümeleri, yerleşim alanlarıyla ilgili daha fazla ayrıntının elde edilmesinde, kentsel alanların otomatik olarak haritalanmasında ve kentsel arazi örtüsü bilgilerinin güncellenmesinde kullanılabilir. Gelişmekte olan şehirlerin değişen arazi

kullanımı/örtüsü hakkında zamanında ve doğru bilgi, kent yöneticileri ve plancılarına karar verme ve planlama süreçlerinde yardımcı olacaktır.

Çıkar Çatışması / Conflict of Interest	Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir. The author declared no conflict of interest
Finansal Destek / Funding conditions	Yazar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir. The author declared that this study has received no financial support

REFERANSLAR

- Ali, M. I., Hasim, A. H., & Abidin, M. R. (2019). Monitoring the built-up area transformation using urban index and normalized difference built-up index analysis. *International Journal of Engineering Transactions B: Applications*, 32(5), 647–653.
- Altman, D. (1999). *Practical statistics for medical research*. CRC Press.
- Baranwal, E., Ahmad, S., & Mudassir, S. M. (2022). New independent component-based spectral index for precise extraction of impervious surfaces through Landsat-8 images. *Geocarto International*. doi: <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2102244>
- Bhatti, S. S., & Tripathi, N. K. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 51(4), 445–467. doi: <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.939539>
- Bouhennache, R., Bouden, T., Taleb-Ahmed, A., & Cheddad, A. (2019). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International*, 34(14), 1531–1551. doi: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1497094>
- Capolupo, A., Monterisi, C., Caporusso, G., & Tarantino, E. (2020). Extracting land cover data using GEE: A review of the classification indices. In *International Conference on Computational Science and Its Applications* (pp. 782–796). Springer.
- Chen, J., Chen, S., Yang, C., He, L., Hou, M., & Shi, T. (2020). A comparative study of impervious surface extraction using Sentinel-2 imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 53(1), 274–292. doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1820383>
- Chen, J., Yang, K., Chen, S., Yang, C., Zhang, S., & He, L. (2019). Enhanced normalized difference index for impervious surface area estimation at the plateau basin scale. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 016502. doi: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.13.016502>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices* (3rd ed.) CRC Press.
- Daramola, M. T., Eresanya, E. O., & Ishola, K. A. (2018). Assessment of the thermal response of variations in land surface around an urban area. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 535–553. doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0463-8>
- Deliry, S. I., Avdan, Z. Y., & Avdan, U. (2021). Extracting urban impervious surfaces from Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data for urban planning and environmental management. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(6), 6572–6586. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11007-4>
- Deng, Y., Wu, C., Li, M., & Chen, R. (2015). RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 40–48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.010>
- Dixit, M., Chaurasia, K., Mishra, V. K., Singh, D., & Lee, H. N. (2022). 6+: A novel approach for building extraction from a medium resolution multi-spectral satellite. *Sustainability*, 14(3), 1615. doi: <https://doi.org/10.3390/su14031615>

- Earth Resources Observation and Science Center (2022, July 16). USGS EROS Archive - Sentinel-2: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- European Space Agency (2022a, July 15). Sentinel Level-1: [https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-
msi/processing-levels/level-1](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1)
- European Space Agency (2022b, July 20). Sen2Cor: <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/>
- Fan, F., Fan, W., & Weng, Q. (2015). Improving urban impervious surface mapping by linear spectral mixture analysis and using spectral indices. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 41(6), 577–586. doi: <https://doi.org/10.1080/07038992.2015.1112730>
- Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., & Lakes, T. (2022). QADI as a new method and alternative to kappa for accuracy assessment of remote sensing-based image classification. *Sensors*, 22(12), 4506. doi: <https://doi.org/10.3390/s22124506>
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)
- Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., & Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 168–182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Harita Genel Müdürlüğü (2022, Eylül 12). İl ve ilçe yüzölçümleri: <https://www.harita.gov.tr/il-ve-ilce-yuzolcumleri>
- Hekimoğlu, B., Altındeğer, M., & Demirbaş, A. R. (2007). *Samsun ilinin fiziki durumu ve avantajları*. Samsun Valiliği Tarım İl Müdürlüğü, 38 s.
- Hidayati, I. N., & Suharyadi, R. (2019, December). A comparative study of various indices for extraction urban impervious surface of Landsat 8 OLI. *Forum Geografi*, 33(2), 162–172. doi: <https://doi.org/10.23917/forgeo.v33i2.9179>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Kaur, R., & Pandey, P. (2022). A review on spectral indices for built-up area extraction using remote sensing technology. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 1–22. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09688-x>
- Kawamura, M., Jayamana, S., & Tsujiko, Y. (1996). Relation between social and environmental conditions in Colombo Sri Lanka and the Urban Index estimated by satellite remote sensing data. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31(PART B7), 321–326.
- Kebede, T. A., Hailu, B. T., & Suryabhagavan, K. V. (2022). Evaluation of spectral built-up indices for impervious surface extraction using Sentinel-2A MSI imageries: A case of Addis Ababa city, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 8, 100568. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100568>
- Li, W. (2019). Mapping urban impervious surfaces by using spectral mixture analysis and spectral indices. *Remote Sensing*, 12(1), 94. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12010094>
- Liu, Q., & Trinder, J. C. (2018). Sub-pixel technique for time series analysis of shoreline changes based on multispectral satellite imagery. In M. Marghany (Ed.), *Advanced Remote Sensing Technology for Synthetic Aperture Radar Applications, Tsunami Disasters, and Infrastructure*. IntechOpen. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81789>
- Liu, F., Zhao, Y., Muhammad, R., Liu, X., & Chen, M. (2020). Impervious surface expansion: A key indicator for environment and urban agglomeration—A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area by using Landsat data. *Journal of Sensors*, 3896589. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/3896589>
- Liu, Y., Meng, Q., Zhang, L., & Wu, C. (2022). NDBSI: A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas. *Catena*, 214, 106265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106265>
- Ma, Y., & Wang, J. (2021). Comparison of impervious surface extraction index based on two kinds of satellite sensors. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 42(2), 139–151. doi: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-8518.2021.02.016>
- Mekânsal Planlama Genel Müdürlüğü (2012). *Samsun bütünleşik kıyı alanları yönetim ve planlama projesi-Mekânsal strateji planı*, 208 s.

- Mourya, M., Kumari, B., Tayyab, M., Paarcha, A., & Rahman, A. (2021). Indices based assessment of built-up density and urban expansion of fast growing Surat city using multi-temporal Landsat data sets. *GeoJournal*, 86, 1607–1623. doi: <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10148-w>
- Navulur, K. (2006). *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm* (1st ed.). CRC Press.
- Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. Z. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in southeast Asia using Landsat 8. *Land*, 10(3), 231. doi: <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Ozturk, D. (2017a). Assessment of urban sprawl using Shannon's entropy and fractal analysis: a case study of Atakum, Ilkadim and Canik (Samsun, Turkey). *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(3), 264–276. doi: <https://doi.org/10.3846/16486897.2016.1233881>
- Ozturk, D. (2017b). Modelling spatial changes in coastal areas of Samsun (Turkey) using a cellular automata-markov chain method. *Tehnički Vjesnik*, 24(1), 99–107. doi: <https://doi.org/10.17559/TV-20141110125014>
- Öztürk, D., & Gündüz, U. (2019). Samsun ili arazi kullanımı/örtüsünün mekânsal-zamansal değişimlerinin fraktal analiz kullanılarak belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 643–660. doi: <https://doi.org/10.17482/uumfd.553486>
- Öztürk, D., & Gündüz, U. (2020). Samsun ilçelerinde kentsel doku morfolojisindeki zamansal değişimlerin fraktal analiz ile belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(64), 81–95. doi: <https://doi.org/10.21205/deufmd.2020226409>
- Roth, K. L., Roberts, D. A., Dennison, P. E., Alonzo, M., Peterson, S. H., & Beland, M. (2015). Differentiating plant species within and across diverse ecosystems with imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 167, 135–151. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.007>
- Shrestha, B., Stephen, H., & Ahmad, S. (2021). Impervious surfaces mapping at city scale by fusion of radar and optical data through a random forest classifier. *Remote Sensing*, 13(15), 3040. doi: <https://doi.org/10.3390/rs13153040>
- Sinha, P., Verma, N. K., & Ayele, E. (2016). Urban built-up area extraction and change detection of Adama municipal area using time-series Landsat images. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 5(8), 1886–1895.
- Stehman, S. V. (2013). Estimating area from an accuracy assessment error matrix. *Remote Sensing of Environment*, 132, 202–211. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.016>
- Su, S., Tian, J., Dong, X., Tian, Q., Wang, N., & Xi, Y. (2022). An impervious surface spectral index on multispectral imagery using visible and near-infrared bands. *Remote Sensing*, 14(14), 3391. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14143391>
- Sun, Z., Guo, H., Li, X., Lu, L., & Du, X. (2011). Estimating urban impervious surfaces from Landsat-5 TM imagery using multilayer perceptron neural network and support vector machine. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 053501. doi: <https://doi.org/10.1117/1.3539767>
- Teixeira Pinto, C., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of Landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote Sensing*, 12(16), 2597. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12162597>
- Türkiye İstatistik Kurumu (2022, Eylül 5). İstatistik Veri Portalı: Nüfus ve Demografi: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109>
- U.S. Geological Survey (2022a, July 7). Earth Explorer: <https://earthexplorer.usgs.gov>
- U.S. Geological Survey (2022b, September 12). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- U.S. Geological Survey (2022c, September 9). Landsat 9 Data Users Handbook: <http://www.gisandbeers.com/GeoBazar/Libros/Teledeteccion/Manual-Landsat-9-Handbook.pdf>
- Varshney, A., & Rajesh, E. (2014). A comparative study of built-up index approaches for automated extraction of built-up regions from remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(3), 659–663. doi: <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0333-9>

- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, 46–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008>
- Wang, Z., Gang, C., Li, X., Chen, Y., & Li, J. (2015). Application of a normalized difference impervious index (NDII) to extract urban impervious surface features based on Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 36(4), 1055–1069. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1007250>
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
- Xi, Y., Thinh, N. X., & Li, C. (2019). Preliminary comparative assessment of various spectral indices for built-up land derived from Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI imageries. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1), 240–252. doi: <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1584737>
- Xia, C., Zhang, A., & Yeh, A. G. O. (2020). Shape-weighted landscape evolution index: An improved approach for simultaneously analyzing urban land expansion and redevelopment. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118836>
- Xu, H. Q. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- Xu, H. (2010). Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(5), 557–565. doi: <https://doi.org/10.14358/pers.76.5.557>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. doi: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- Zhang, L., Tian, Y., & Liu, Q. (2020). A novel urban composition index based on water-impervious surface-pervious surface (WIP) model for urban compositions mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing*, 13(1), 3. doi: <https://doi.org/10.3390/rs13010003>
- Zhang, S., Yang, K., Li, M., Ma, Y., & Sun, M. (2018). Combinational biophysical composition index (CBCI) for effective mapping biophysical composition in urban areas. *IEEE Access*, 6, 41224–41237. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2857405>
- Zhang, S., Yang, K., Ma, Y., & Li, M. (2021). The Expansion Dynamics and Modes of Impervious Surfaces in the Guangdong-Hong Kong-Macau Bay Area, China. *Land*, 10(11), 1167. doi: <https://doi.org/10.3390/land10111167>
- Zhang, Y., Odeh, I. O., & Han, C. (2009). Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4), 256–264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.03.001>

