



Samsun-Atakum'da Kentsel Geçirimsiz Yüzey Alanlarının Sentinel-2 Uydu Görüntülerinden Spektral İndeksler Kullanılarak Belirlenmesi

Extraction of Urban Impervious Surface Areas in Samsun-Atakum Using Spectral Indices from Sentinel-2 Satellite Images

Derya Öztürk*^a

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi

DOI:

10.33688/aucbd.1164879

Makale Geçmişi:

Geliş: 21.08.2022

Kabul: 07.11.2022

Anahtar Kelimeler:

Kentleşme

Geçirimsiz yüzey indeksi

Uzaktan algılama

Sentinel-2

Atakum

Öz

Günümüzde hızlı kentleşmeyle birlikte geçirimsiz yüzeyler hızla artmakta ve çeşitli çevresel ve ekolojik sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle geçirimsiz yüzeylerin uzaktan algılama gibi etkin yöntemlerle takibi önem kazanmaktadır. Bu çalışmada yüksek kentleşme oranına sahip Samsun-Atakum ilçesinde 07.07.2022 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüsünden UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI indeksleri kullanılarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında geçirimsiz yüzey alanları çıkarılmış, indekslerin performansı spektral ayırım indeksi ve hata matrisi yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Analizlerin sonucunda çalışma alanında en başarılı indeksin NISI olduğu belirlenmiştir. NISI indeksi 1,3605 spektral ayırım indeksi, % 89,20 genel doğruluk ve 0,7850 kappa değeriyle yüksek performans göstermiş, hem binaların hem de yolların çıkarımında başarılı olmuştur. NISI indeksi sonuçlarına göre çalışma alanında incelenen 30 mahallenin 5'inde geçirimsiz yüzey alanlarının %40'ın üzerinde ve 2'sinde % 30-40 arasında olduğu belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Sentinel-2 uydu görüntülerinin geçirimsiz yüzey çıkarımında önemli bir potansiyel taşıdığını ve farklı indekslerin karşılaştırılması sonucunda belirlenen optimum indeksin kullanılmasıyla geçirimsiz yüzey çıkarım başarısının artırılabileceğini ortaya çıkarmıştır.

Article Info

Research Article

DOI:

10.33688/aucbd.1164879

Article History:

Received: 21.08.2022

Accepted: 07.11.2022

Keywords:

Urbanization

Impervious surface index

Remote sensing

Sentinel-2

Atakum

Abstract

Impervious surfaces are increasing rapidly and causing many environmental and ecological problems because of rapid urbanization. It is important to monitor impervious surfaces through effective methods, such as remote sensing. In this study, impervious surface areas were extracted from the Sentinel-2 satellite image (July 7, 2022) in Samsun-Atakum district using UI, NDBI, IBI, CBCI, and NISI indices in the GIS environment and the indices performances were compared using the spectral discrimination index and error matrix approach. NISI was the most accurate index with a spectral discrimination index of 1.3605, an overall accuracy of 89.20%, and a kappa value of 0.7850. According to NISI, the impervious surface areas were over 40% in 5 of the 30 neighborhoods and between 30-40% in 2 neighborhoods. The results showed that Sentinel-2 satellite images have considerable potential in the extraction of impervious surfaces, and the success of impervious surface extraction can be increased by using the optimum index determined by comparing different indices.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: dozturk@omu.edu.tr

^a Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0002-0684-3127>

1. Giriş

Geçirimsiz yüzey, suyun sızamadığı yüzey olarak tanımlanır. Geçirimsiz yüzeyler temel olarak ulaşım (sokaklar, otoyollar, otoparklar, kaldırımlar) ve binalar gibi insan faaliyetleri ve yerleşimi ile ilgili antropojenik arazi yüzey özellikleri ile ilişkilendirilmektedir (Bauer vd., 2007; Slonecker vd., 2001). Geçirimsiz yüzey alanları, kentsel değişimin önemli bir göstergesidir. Bu nedenle insan faaliyetlerini ve kentsel dinamikleri takip etmek açısından esas oluşturmaktadır (Wang vd., 2015). Bununla birlikte kentsel ekolojik ve çevresel değişime de neden olduğundan son yıllarda sadece kentleşme derecesinin değil, aynı zamanda ekoloji ve çevre kalitesinin de önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Chen vd., 2019; Weng, 2012).

Günümüzde dünya nüfusunun yarısından daha fazlası kentlerde yaşamaktadır. Gelecekte bu oranın daha da artacağı ve yaklaşık % 70'e ulaşacağı tahmin edilmektedir (Ertan, 2019; Wang vd., 2015). Birleşmiş Milletler raporuna göre 2010 yılında 3,5 milyar olan dünya kentsel nüfusunun 2050 yılına kadar neredeyse iki katına çıkması beklenmektedir (United Nations, 2014). Geçirimsiz yüzeylerin büyüklük, konum ve geometrisiyle mekânsal olarak belirlenmesi ve değişimlerin saptanması, kentsel arazi kullanımı/arazi örtüsü değişimlerinin anlaşılması, kentsel büyümenin değerlendirilmesi ve geçirimsiz yüzeylerin artmasının neden olduğu çevre sorunlarının ele alınarak kentsel planlama ve çevre/kaynak yönetimi açısından oldukça önemlidir (Chen vd., 2019; Su vd., 2022; Weng, 2012).

Geçirimsiz yüzey alanlarındaki değişimler, bir şehirdeki çevresel değişimin temel göstergesidir (Arnold ve Gibbons, 1996; Li vd., 2016; Wang, 2015). Geçirimsiz yüzeylerin artması, kentsel yüzey akışının miktarında, süresinde ve yoğunluğunda artışa yol açmakta ve bu durum sel ve taşkınların şiddet ve sıklığını artırmaktadır. Geçirimsiz yüzeyler ayrıca yeraltı suyu beslemesinde düşüş yaratmaktadır (Weng, 2012). Kentleşmenin hızlı gelişimiyle doğal peyzajın genişleyen yapay yüzeylerle değiştirilmesi mikro iklim değişikliğine, kentsel ısı adası etkisine ve kuraklığa neden olmaktadır (Chen vd., 2020; Hidayati ve Suharyadi, 2019; Wang vd., 2015). Geçirimsiz yüzeylerin artmasının neden olduğu akıştaki artış, patojenler ve toksik kirleticilerin taşınmasını doğrudan etkileyerek bir drenaj havzasındaki akarsu, göl ve göletlerin su kalitesini etkilemektedir. Dolayısıyla şehir plancıları, mühendisler, peyzaj mimarları, sosyal bilimciler ve yerel yetkililer dâhil olmak üzere birçok meslek disiplini için geçirimsiz yüzeyler ortak bir tema olup konu hakkındaki araştırmalar son yıllarda büyük ilgi görmüştür (Wang vd., 2015; Weng, 2012). Yapılan araştırmalarda kentleşmeyle birlikte artan geçirimsiz yüzeylerin yerel iklim ve yeraltı suyu seviyesi üzerindeki etkileri (Patra vd., 2018), geçirimsiz yüzeylerin artışının yüzey akışı ve sel tehlikesine etkileri (Ansari vd., 2016; Du vd., 2015), geçirimsiz yüzey alanlarının su kalitesine etkileri (Carlson, 2007; Liu vd., 2013), peyzaj yapısının ve geçirimsiz yüzey dağılımının kentsel ısı adaları üzerindeki etkileri (Li vd., 2011; Sekertekin ve Zadbagher, 2021) ve geçirimsiz yüzeylerin genişlemesinin kuraklığın artmasında ve bitki örtüsü üzerindeki olumsuz etkileri (McClung ve Ibáñez, 2018) ortaya konulurken geçirimsiz yüzey çıkarımının önemi vurgulanmaktadır.

Geçirimsiz yüzeyler mevcut haritalar kullanılarak veya klasik yersel ölçmeler, GNSS (küresel konum belirleme sistemi) ölçmeleri, fotogrametri ve uzaktan algılama teknikleri ile belirlenebilir (Weng, 2012). Ancak mevcut haritalar çoğu zaman güncel olmadığından araştırmalar için yetersiz kalmaktadır. Geçirimsiz yüzeylerin güncel olarak elde edilmesinde ise özellikle gelişmekte olan ülkeler

için maliyet ve iş gücü açısından etkin bir tekniğin kullanılması oldukça önemlidir. Bu durum özellikle çoklu coğrafi alanlar ve geniş çalışma sahaları söz konusu olduğunda daha da önem kazanmaktadır (Shrestha vd., 2021). Uzaktan algılama geniş alanların farklı çözünürlük düzeylerinde alternatif uydu görüntülerinden hızlı, ekonomik ve tekrarlı olarak verilerinin elde edilebilme özelliklerinden dolayı kentsel alanlarda geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde ve değişimlerin saptanmasında son zamanlarda büyük bir ilgi görmüş ve birçok araştırmada geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde uzaktan algılamanın potansiyeli ortaya konulmuştur (Chen vd., 2019; Weng, 2012). Günümüzde uydu görüntülerinin sayısının artması ve sayısal görüntü işleme teknikleriyle otomatik/yarı otomatik bilgi çıkarım olanakları, özellikle geniş alanlarda uzaktan algılamayı geçirimsiz yüzey çıkarımında önemli bir araç haline getirmiştir (Kaur ve Pandey, 2022; Parekh vd., 2021).

Geçirimsiz yüzeylerin uydu görüntülerinden görüntü işleme yöntemleri ile çıkarımında nesnelerin spektral imza özelliklerinden yararlanır (Slonecker vd., 2001). Geçirimsiz yüzeylerin haritalanmasında kullanılan başlıca yöntemler; karar ağacı modelleri, regresyon modelleri, görüntü sınıflandırma teknikleri ve spektral indekslerdir (Chen vd., 2019; Lu vd., 2014). Bu yöntemler arasında spektral indeksler uydu görüntülerinin bantlarında gerçekleştirilen basit matematiksel işlemlere dayalı olduğundan kolay uygulanabilirliği ve karşılaştırmalı analizlerin etkin bir şekilde yapılabilmesinden dolayı geniş bir uygulama alanı bulmuş ve çok sayıda geçirimsiz yüzey indeksi geliştirilmiştir (Chen vd., 2019; Deng ve Wu, 2012; Kaur ve Pandey, 2022; Sun vd., 2016; Xu, 2008; Zha vd., 2003; Zhang vd., 2018). Ancak geçirimsiz yüzeylerin spektral heterojenliği ve kentsel peyzajın mekânsal deseni nedeniyle uzaktan algılama verilerinden geçirimsiz alan çıkarımında birtakım zorluklar da bulunmaktadır (Lu vd., 2011; Wang, 2015). Çeşitli araştırmalar, çıplak toprağın geçirimsiz yüzeylerle benzer yansıtım göstererek (özellikle NIR ve SWIR1 değerleri açısından) hatalı yorumlanabileceğini göstermiştir (Chen vd., 2019; Sun vd., 2011). Bununla birlikte aynı arazi örtüsü sınıfında yüksek spektral varyasyon söz konusu olabilmektedir. Ayrıca uydu görüntülerindeki herhangi bir dağın, ağacın veya büyük binanın gölgesi, geçirimsiz yüzey çıkarma doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Kentsel alanların heterojenliği nedeniyle piksel boyutunun artmasına bağlı olarak artan karışık piksel problemi de önemli bir sorun oluşturmaktadır (Lu ve Weng, 2004; Wang, 2015). Buna karşın geçirimsiz yüzey çıkarımında farklı algoritmaların kullanılmasıyla doğruluk ve verimlilik büyük ölçüde geliştirilebilmektedir. Bir algoritmanın uygulanabilirliği çalışma alanına bağlı olup, çalışma alanlarında farklı algoritmaların karşılaştırmalı çalışmasının yapılması önemlidir (Chen vd., 2020).

Geçirimsiz yüzeylerin spektral indekslerden belirlenmesinde birçok uydu görüntüsü alternatifi bulunmasına karşın Sentinel-2 görüntüleri, veri sürekliliği ve ücretsiz temin edilebilen diğer uydu görüntülerine kıyasla daha yüksek mekânsal ve spektral çözünürlüğü ile geçirimsiz yüzey çalışmaları için önemli bir veri kaynağı olmuş ve birçok araştırmada kullanım etkinliği kanıtlanmıştır (Deliry vd., 2021; Kebede vd., 2022; Li vd., 2021; Ma ve Wang, 2021; Valdiviezo-N, 2018).

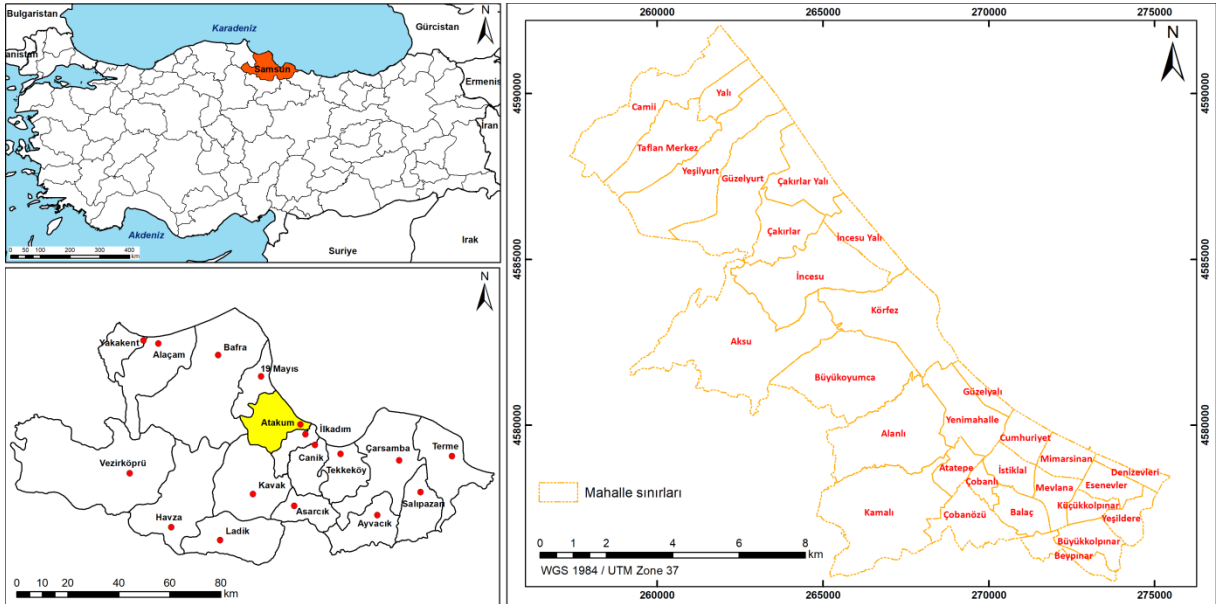
Bu çalışmada Türkiye'nin en yüksek nüfus artışı ve yapılaşma oranına sahip ilçelerinden biri olan ve nüfus artışıyla birlikte geçirimsiz yüzeylerin hızla artış gösterdiği Samsun'un Atakum ilçesinde (Öztürk, 2015, 2017) Sentinel-2 uydu görüntülerinden 2022 yılı için geçirimsiz yüzey alanlarının haritalanmasında kent indeksi (urban index - UI), normalleştirilmiş fark yapay alan indeksi (normalized difference built-up index - NDBI), indeks tabanlı yapay alan indeksi (index-based built-up index - IBI),

kombinasyonel biyofiziksel bileşim indeksi (combinational biophysical composition index - CBCI) ve normalleştirilmiş geçirimsiz yüzey indeksi (normalized impervious surface index - NISI) olmak üzere beş farklı geçirimsiz yüzey indeksinin uygulanabilirliğinin ve performansının analiz edilmesi amaçlanmaktadır.

2. Çalışma Alanı

Samsun iline bağlı Atakum ilçesi (Şekil 1), 35°58'45"-36°19'00" doğu boylamları ile 41°13'30"-41°26'45" kuzey enlemleri arasında yer alır. Ilıman bir iklime sahip olan Atakum'un yıllık ortalama sıcaklığı 14,4 °C'dir (Öztürk, 2015). Doğusunda İlkadım ilçesi, batısında 19 Mayıs ilçesi, kuzeyinde Karadeniz, güneyinde ise Kavak ve Bafra ilçeleri ile çevrilidir (Atakum Belediyesi, 2014). Kürtün Çayı'ndan deniz kıyısı boyunca 20 km batıya doğru uzanan ilçe; kıyı ovaları, eğimli araziler, alçak platolar ve dağlık alanlar olmak üzere dört morfolojik birimden oluşmaktadır. Kıyı ovalarının doğuda Kürtün Nehri ve batıda Kızılırmak Nehri'ndeki alüvyonların oluşturduğu verimli topraklar olmalarına rağmen tamamına yakını yerleşim için kullanılmıştır. Atakum'da yerleşimlerin çoğu kıyı ovalarında kuruludur ancak son yıllarda kıyı ovaları ile alçak platolar arasındaki eğimli alanlarda da yoğun yerleşim görülmektedir (Atakum Kaymakamlığı, 2013). Atakum'un yıllık ortalama büyüme hızı yaklaşık % 63,5 olup Türkiye'nin en yüksek nüfus artışına sahip ilçeleri arasında yer almaktadır (Öztürk, 2015, 2017). Atakum'da 2021 yılı itibarıyla nüfus 238702'ye ulaşmıştır (Türkiye İstatistik Kurumu, 2022). Karadeniz bölgesinin en büyük ve en önemli üniversitelerinden birinin Atakum'da bulunması, ulaşım kolaylığı, sahil ve kumsalların çekiciliği ve suç oranlarının düşük olmasına bağlı olarak Samsun'un diğer ilçelerinden ve diğer illerden önemli ölçüde göç almaktadır (Öztürk, 2015).

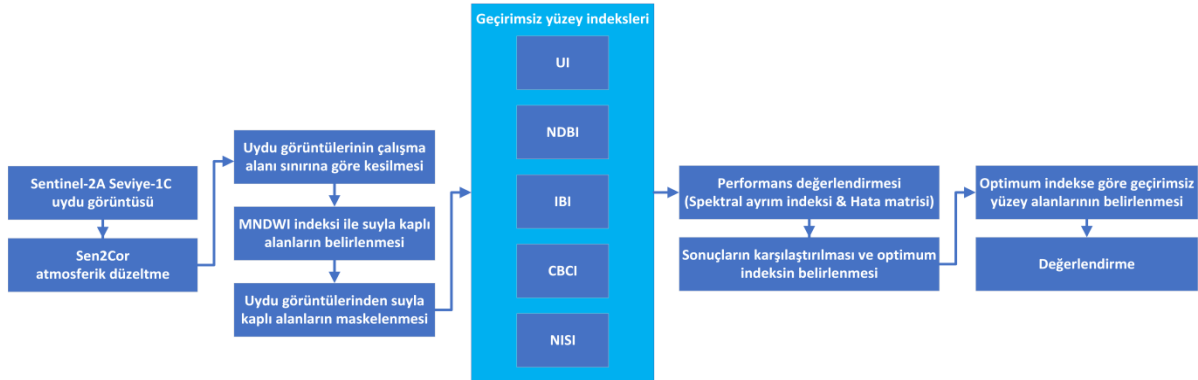
Bu çalışmada, Atakum'un 56 mahallesinden nüfus artışı, kentleşme potansiyeli ve kentsel gelişimin en fazla olduğu ve Atakum nüfusunun % 97'sini kapsayan ve 107,72 km² yüzölçümünde 30 mahalleye odaklanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı

3. Metodoloji

Bu çalışmada Samsun'un Atakum ilçesinde belirlenen çalışma alanında 2022 yılı için geçirimsiz yüzeyler Sentinel-2A uydu görüntüsünden beş adet spektral geçirimsiz yüzey indeksi (UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI) kullanılarak belirlenmiştir. Görüntü önışlemeden sonra uydu görüntülerinin bantları çalışma alanı sınırlarına göre kesilmiştir. Modifiye edilmiş normalleştirilmiş fark su indeksi (modified normalized difference water index- MNDWI) kullanılarak suyla kaplı alanlar belirlenmiş ve analizlerden önce uydu görüntülerinde bu alanlar maskelenmiştir. Daha sonra geçirimsiz yüzey indeksleri uygulanmış ve indeks görüntülerinde eşik değerler tespit edilerek geçirimsiz yüzey alanları çıkarılmıştır. Geçirimsiz yüzey indeks sonuçlarının performanslarının değerlendirilmesinde spektral ayırım indeksi (spectral discrimination index- SDI) ve Google Earth (GE) Pro tarafından açık veri olarak erişimi sağlanan yüksek çözünürlüklü görüntülerden alınan arazi örtüsü örnekleriyle gerçekleştirilen hata matrisi ile doğrulama uygulanmıştır. Oluşturulan hata matrisinde üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk ve kappa değerleri hesaplanmıştır. Uydu görüntülerinden indeks analizleri ArcGIS 10.0 yazılımı ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında gerçekleştirilmiştir. Sentinel-2A uydu görüntülerinden geçirimsiz yüzeylerin elde edilmesinde izlenen temel işlem adımları Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Çalışmanın temel işlem adımları

3.1. Veri ve Önışleme

Çalışmada ana veri kaynağı olarak, ABD Jeolojik Araştırma Dairesi (USGS) web sitesinden ücretsiz olarak indirilen ve açık veri kaynağı olan Sentinel-2A görüntüleri kullanılmıştır. Sentinel-2, görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bantlarını kapsayan 13 spektral bantlı bir multispektral görüntüleyici (MSI) taşıyan bir uydudur. 10 m piksel boyutlu 4 adet bant (Bant 2, Bant 3, Bant 4 ve Bant 8), 20 metre piksel boyutlu 6 bant (vegetasyon karakterizasyonu için 4 dar bant (Bant 5, Bant 6, Bant 7, Bant 8A) ve kar/buz/bulut tespiti veya bitki örtüsü nem stresi değerlendirmesi gibi uygulamalar için 2 geniş SWIR bandı (Bant 11 ve Bant 12)), 60 m piksel boyutlu 3 bant (esas olarak bulut tespiti ve atmosferik düzeltmeler için (aerosoller için Bant 1, su buharı için Bant 9 ve sirus tespiti için Bant 10)) bulundurmaktadır (Earth Resources Observation and Science Center, 2022). Bu çalışmada 07.07.2022 tarihli Sentinel-2A Seviye-1C verileri kullanılmıştır. Seviye-1C işleme ortorektifikasyonla geometrik düzeltme ve radyometrik düzeltmeleri içerir. Seviye-1C verileri atmosfer üstü (TOA) yansıtım verilerine dönüştürülmüş verilerdir (European Space Agency, 2022a). Mutlak coğrafi konumlandırma hatası %

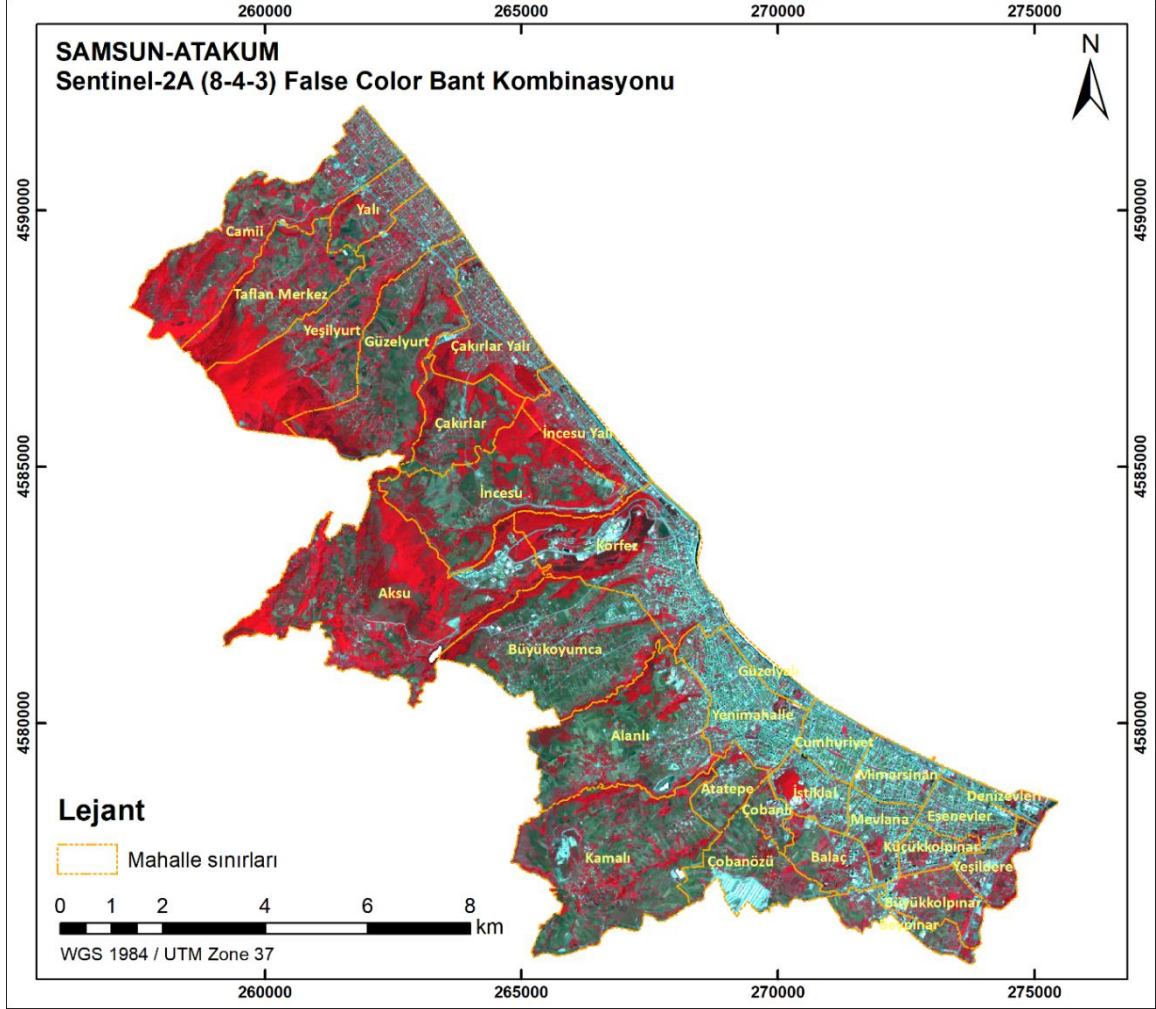
95.5 güven aralığında 12 m'den küçüktür (European Space Agency, 2022b). Uydu görüntülerinin teknik özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Sentinel-2 uydu görüntülerinin teknik özellikleri

Bant No	Dalgaboyu merkez değeri (nm)	Bant genişliği (nm)	Piksel boyutu (m)
Bant 1- Coastal	443	20	60
Bant 2- Blue	490	65	10
Bant 3- Green	560	35	10
Bant 4- Red	665	30	10
Bant 5- Vegetation Red Edge	705	15	20
Bant 6- Vegetation Red Edge	740	15	20
Bant 7- Vegetation Red Edge	783	20	20
Bant 8- NIR	842	115	10
Bant 8A- Narrow NIR	865	20	20
Bant 9- Water Vapour	945	20	60
Bant 10- SWIR Cirrus	1375	30	60
Bant 11- SWIR1	1610	90	20
Bant 12- SWIR2	2190	180	20

Kaynak: Earth Resources Observation and Science Center, 2022

Atmosferik düzeltme, atmosferik moleküllerin ve aerosollerin saçılması ve su, oksijen, karbondioksit, metan ve ozon içeriği gibi atmosferik bileşimin yüzey yansıtımı üzerindeki etkilerini ortadan kaldırır. Atmosferik düzeltmeden sonra atmosferik etkiler giderilir ve farklı uzaktan algılama görüntüleri arasındaki farklar en aza indirilir (Chen vd., 2020). Bu çalışmada, Sentinel 2 görüntülerinin atmosferik düzeltmesi için Sen2Cor (European Space Agency, 2022c) kullanılmış ve TOA Seviye-1C verileri Atmosferin Alt Seviyesi (BOA) verilerine dönüştürülmüştür. Çalışma alanının 8-4-3 False Color bant kombinasyonu Şekil 3'te yer almaktadır.



Şekil 3. Samsun-Atakum Sentinel-2A (8-4-3) false color bant kombinasyonu

3.2. Spektral İndekslerden Geçirimsiz Yüzeylerin Belirlenmesi

Geçirimsiz yüzey indeksleri, özel uyarlanmış matematiksel algoritmalar kullanılarak uydu görüntülerinden hızlı ve etkin olarak geçirimsiz yüzey bilgilerinin elde edilmesini sağlar (Chen vd., 2020). Bu çalışmada geçirimsiz yüzey alanlarının belirlenmesinde UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI indeksleri kullanılmıştır. İndekslerde kullanılan ρ_{Blue} , ρ_{Green} , ρ_{Red} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR_1} ve ρ_{SWIR_2} sırasıyla mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi, birinci kısa dalga kızılötesi ve ikinci kısa dalga kızılötesi bantların yüzey yansıtım değerleridir.

UI indeksi (Denklem 1) uydu görüntülerinde ikinci kısa dalga kıızılötesi ve yakın kıızılötesi bantların yüzey yansıtım değerleri kullanılarak hesaplanır (Kawamura vd., 1996).

$$UI = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

NDBI indeksinin (Denklem 2) UI indeksinden farkı, ikinci kısa dalga kıızılötesi bant yerine birinci kısa dalga kıızılötesi bandın kullanılmasıdır (Zha vd., 2003).

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

IBI indeksi (Denklem 3), NDBI indeksi ile toprak dengelemeli bitki indeksi (soil adjusted vegetation index - SAVI) (Denklem 4) ve MNDWI indeksini (Denklem 5) entegre eder. IBI indeksinin hesaplanmasında NDBI, SAVI ve MNDWI değerlerinin 0–1 aralığında normalleştirilmesi gerekir (Xu, 2008).

$$IBI = \frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2} \quad (3)$$

$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})(1+l)}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + l} \quad (4)$$

SAVI indeksinin hesabında kullanılan l , 0 ile 1 arasında değişen bir düzeltme faktörü olup bu çalışmada alanın özelliğine bağlı olarak 0,5 olarak alınmıştır.

$$MNDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \quad (5)$$

CBCI indeksi (Denklem 6) değiştirilmiş çıplak toprak endeksi (modified bare soil index - MBSI) (Denklem 7) ve optimize edilmiş toprak dengelemeli bitki indeksinin (optimized soil adjusted vegetation index - OSAVI) (Denklem 8) birleşimine dayalıdır (Zhang vd., 2018).

$$CBCI = (A + 1) * MBSI - OSAVI + A \quad (6)$$

$$MBSI = \frac{(\rho_{Red} - \rho_{Green}) * 2}{\rho_{Red} + \rho_{Green} - 2} \quad (7)$$

$$OSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red} + 0.16} \quad (8)$$

SAVI indeksinin hesabında kullanılan A düzeltme faktörü olup bu çalışmada 0,5 olarak alınmıştır.

NISI indeksi (Denklem 9), mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kıızılötesi bantların yüzey yansıtım değerlerine bağlı olarak hesaplanır (Su vd., 2022).

$$NISI = \frac{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) - \rho_{NIR}}{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) + \rho_{NIR}} \quad (9)$$

Geçirimsiz yüzey indeksi denklemlerine göre sadece IBI MNDWI'ı denkleme entegre ederek suyla kaplı alanların etkisini azaltmaktadır. Diğer indeksler için de (UI, NDBI, CBCI, NISI) bu etkinin ortadan kaldırılması ve geçirimsiz yüzey alanlarının çıkarım doğruluğunun artırılması için çalışma alanında suyla kaplı alanlar MNDWI indeksine göre maskelenmiştir.

3.3. Eşik Değer Seçimi

İndeks yöntemlerinin kullanıldığı görüntü sınıflandırmasının önemli bir bileşeni olan eşik değer seçimi, indekslerden geçirimsiz yüzey bilgisinin çıkarımının da temel adımı ve anahtarıdır (Chen vd., 2019; Su vd., 2022). Kullanılan indeks ne kadar başarılı sonuç verirse versin eşik değer doğru seçilmediği takdirde sonuç başarısı düşük olacak ve geçirimsiz yüzeyler olduğundan daha az veya daha fazla tahmin edilecektir (Su vd., 2022). Çalışma alanında her bir indeks için optimum eşik değerini belirleyerek eşik değer seçiminin olası olumsuz etkisini azaltmak için bilinen piksellerden yararlanılarak manuel eşik belirleme (Chen vd., 2019; Li vd., 2021; Lu vd., 2010; Su vd., 2022) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla GE Pro üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden çalışma alanındaki tüm geçirimsiz yüzey özelliklerinden (çatı, beton yol, asfalt yol, otopark, kaldırım vb.) toplam 86 nokta seçilerek oluşturulan örneklem kümesi indeks sonuçlarıyla karşılaştırılarak başlangıç eşik değerleri belirlenmiş, ardından geçirimsiz yüzeyler ile karışan detaylar denetlenerek deneme yanılma yöntemiyle etkileşimli bir biçimde nihai eşik değerlere karar verilmiştir.

3.4. Performans Değerlendirmesi

Geçirimsiz yüzey indekslerinin performansının sadece görsel olarak denetlenmesi yanıltıcıdır. İndeks sonuçları SDI ve hata matrisi yaklaşımı ile performans açısından değerlendirilebilmektedir (Chen vd., 2020; Foody, 2002). Bu çalışmada geçirimsiz yüzey indeks sonuçlarının performans değerlendirilmesi için SDI ve hata matrisi yaklaşımı uygulanmıştır. Hata matrisinin oluşturulmasında GE Pro üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden geçirimsiz yüzey alanları için 225 ve diğer alanlar için 164 adet nokta seçilerek üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel sınıflandırma doğruluğu ve kappa değerleri hesaplanmıştır. Noktaların seçiminde çalışma alanına homojen dağılması ve her sınıf için farklı yüzey özelliklerini kapsamasına dikkat edilmiştir. Bu amaçla doğrulama noktaları geçirimsiz yüzey sınıfı için yol, bina, kaldırım yüzeylerinden ve diğer alanlar sınıfı için yeşil alan, tarım alanı, çıplak toprak yüzeylerinden seçilmiştir.

3.4.1. Spektral Ayrım İndeksi (SDI)

Spektral indeksler yoluyla çıkarılan geçirimsiz yüzeylerin doğruluğunun değerlendirilmesinde geçirimsiz yüzeyler ve diğer alanlar sınıfı arasındaki spektral ayrım başarısını ölçmek için sınıf ortalamalarına ve standart sapmalarına dayalı olarak Denklem 10'da belirtildiği gibi hesaplanan SDI kullanılabilir (Kebede vd., 2022). İki sınıf arasındaki ayrılabilirlik derecesi, sınıflar arasındaki varyans ve sınıf içi varyans olmak üzere iki faktöre bağlı olup SDI değerinin yüksek olması geçirimsiz yüzeylerin diğer alanlardan iyi ayrıldığı anlamına gelmektedir (Chen vd., 2020). Spektral ayrım ölçeğine göre $SDI < 1$ ise sınıflar spektral olarak örtüştüğünden “zayıf”, $1 \leq SDI < 3$ ise “iyi” ve $SDI \geq 3$ ise “çok iyi” spektral ayrım söz konusudur (Bouhennache vd., 2019).

$$SDI = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (10)$$

Burada; μ_1 ve μ_2 sırasıyla geçirimsiz yüzey alanları ve diğer alanlar sınıfları için ortalama indeks değerleri, σ_1 ve σ_2 , iki sınıf için standart sapmalardır (Chen vd., 2020).

3.4.2. Hata Matrisi

Hata matrisi gerçek (referans) verilerle sınıflandırma sonucu (tahmin) arasındaki uyumu gösteren bir tablodur (Navulur, 2006). Hata matrislerinden referans ve sınıflandırma verileri karşılaştırılarak üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk (toplam doğruluk) ve kappa gibi çeşitli sınıflandırma doğruluk kriterleri belirlenebilir (Batra vd., 2020).

Üretici doğruluğu, her sınıf için doğru sınıflandırılmış piksellerin sayısının bu sınıf için kullanılan referans piksellerinin sayısına bölünmesiyle; kullanıcı doğruluğu, her sınıf için doğru sınıflandırılmış piksel sayısının o sınıfa atanan piksellerin toplamına bölünmesiyle hesaplanır. Üretici doğruluğu, referans piksellerinin ne kadar doğru sınıflandırılabildiğini ve kullanıcı doğruluğu, her sınıf için atanan piksellerin o sınıfı gerçekte temsil etme doğruluğunu gösterir. Genel doğruluk, doğru sınıflandırılmış toplam piksel sayısının (köşegen toplamı) referans piksellerinin toplamına bölünmesiyle elde edilir (Congalton ve Green, 2019; Navulur, 2006).

Kappa değeri, hata matrisinin satır ve sütun toplamları, köşegen üzerindeki değerler ve toplam referans piksellerinin sayısı kullanılarak Denklem 11'e göre hesaplanır. Kappa, 0 ila 1 arasında değerler alır ve değer yüksek olması doğruluğun yüksek olması anlamındadır (Batra vd., 2020). Sınıflandırılmış veriler ve referans verileri arasındaki uyum kappa değeri 0,8'den büyükse güçlü (mükemmel), 0,6–0,8 arasındaysa önemli, 0,4–0,6 arasındaysa orta düzeydedir. Değer 0,4'ten küçükse zayıf uyum söz konusudur (Zheng vd., 2015).

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} X_{+i})} \quad (11)$$

Burada; κ kappa değeri, N toplam referans pikseli sayısı, r sınıf sayısı (satır ve sütun sayısı), X_{ii} i. satır ve i. sütundaki değer (köşegen değeri), X_{i+} i. satır toplamı ve X_{+i} i. sütun toplamıdır (Batra vd., 2020).

4. Bulgular

Samsun-Atakum'da inceleme alanında 07.07.2022 tarihli Sentinel-2A uydu görüntüsü kullanılarak UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI geçimsiz yüzey indeksleri uygulanarak indekslerin performansları karşılaştırılmıştır. En yüksek doğruluk gösteren indeks kullanılarak mahalle bazında geçirimsiz yüzey alanları ve yüzdeleri hesaplanmıştır.

4.1. Geçirimsiz Yüzey İndeksi Sonuçları

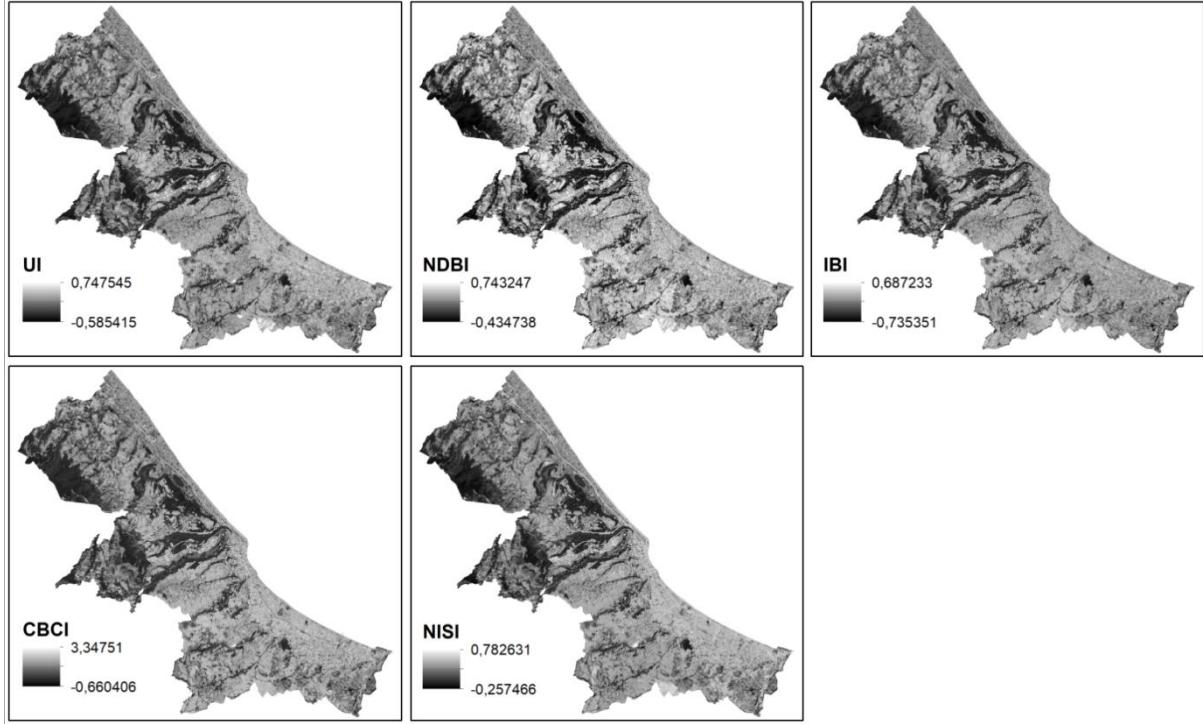
Çalışma alanında uygulanan UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI geçimsiz yüzey indeks sonuçları Şekil 4'te gösterilmektedir. İndeks sonuçlarının değer aralıkları UI için (-0,585415 – 0,747545), NDBI için (-0,434738 – 0,743247), IBI için (-0,735351 – 0,687233), CBCI için (-0,660406 – 3,347510) ve NISI için (-0,257466 – 0,782631)'dir. Her indeks için kendi değer aralığında yüksek değerler yüksek geçirimsizliği gösterirken düşük değerler düşük geçirimsizliğe işaret etmektedir.

UI, NDBI, IBI, CBCI ve NISI indekslerinde GE Pro üzerinden erişilen yüksek çözünürlüklü görüntülerden yararlanılarak belirlenen optimum eşik değerlerinin (Çizelge 2) uygulanması sonucunda geçirimsiz yüzey alanları ve diğer alanlar olmak üzere iki sınıflı görüntüler oluşturulmuştur (Şekil 5).

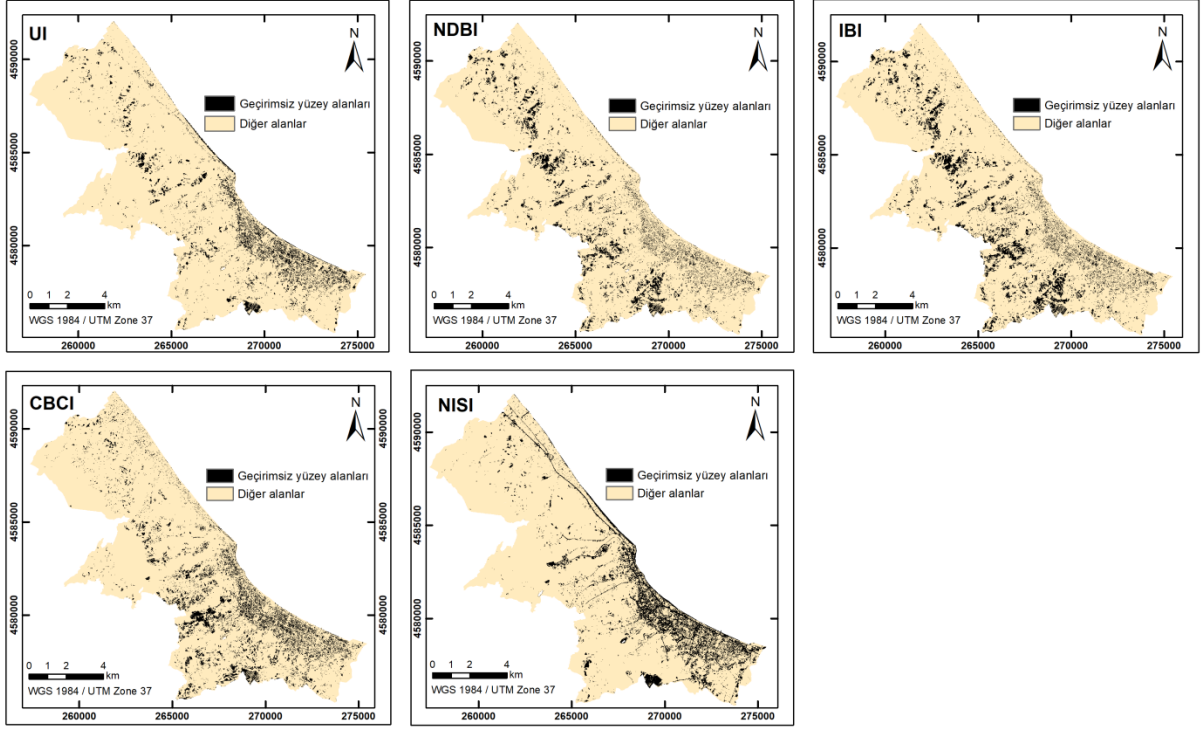
Geçirimsiz yüzeyler yol, kaldırım, bina ve otopark gibi yapay yüzeyleri, diğer alanlar ise çıplak toprak, ormanlık alan, otlak gibi doğal yüzeyleri kapsamaktadır.

Çizelge 2. Eşik değerler

UI	NDBI	IBI	CBCI	NISI
0,030718	0,102508	0,015268	0,585745	0,3713804



Şekil 4. İndeks sonuçları



Şekil 5. İndeks sonuçlarına göre geçirimsiz yüzey alanları

İndeks sonuçlarına göre belirlenen geçirimsiz yüzey alanları ve diğer alanların yüzölçümleri Çizelge 3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Geçirimsiz yüzey indeks sonuçlarına göre yüzölçümü değerleri

İndeks	Özellik	Alan (km ²)
UI	Geçirimsiz yüzey alanları	8,05
	Diğer alanlar	99,53
NDBI	Geçirimsiz yüzey alanları	9,85
	Diğer alanlar	97,73
IBI	Geçirimsiz yüzey alanları	12,04
	Diğer alanlar	95,54
CBCI	Geçirimsiz yüzey alanları	11,44
	Diğer alanlar	96,14
NISI	Geçirimsiz yüzey alanları	12,15
	Diğer alanlar	95,43

Çizelge 3'e göre geçirimsiz yüzey alanları 8,05–12,15 km² arasında değişmektedir. En yüksek değer NISI, en düşük değer ise UI indeksi sonucunda elde edilmiştir.

4.2. İndeks Performanslarının Değerlendirilmesi

Geçirimsiz yüzey indekslerinin performans değerlendirmesi için geçirimsiz yüzey alanları ve diğer alanlar arasındaki spektral ayrımı gösteren SDI ve doğrulama örneklerinden hata matrisi yaklaşımları kullanılmıştır. İndeksler için hesaplanan SDI değerleri Çizelge 4'te, hata matrisi ve doğruluk hesabı Çizelge 5'te yer almaktadır. Geçirimsiz yüzey alanları için 225 ve diğer alanlar için 164 adet referans noktası kullanılarak oluşturulan hata matrisinden doğruluk değerlendirmesinde üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk ve kappa katsayıları hesaplanmıştır.

Çizelge 4. Geçirimsiz yüzey indekslerinin SDI değerleri

İndeks	Özellik	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart sapma	SDI
UI	Geçirimsiz yüzey alanları	0,030719	0,747545	0,082134	0,058117	1,2548
	Diğer alanlar	-0,58542	0,030717	-0,18987	0,158659	
NDBI	Geçirimsiz yüzey alanları	0,102509	0,743247	0,134534	0,035581	1,2827
	Diğer alanlar	-0,43474	0,102508	-0,06547	0,120336	
IBI	Geçirimsiz yüzey alanları	0,015268	0,687233	0,0506	0,035486	1,2607
	Diğer alanlar	-0,73535	0,015267	-0,19113	0,15626	
CBCI	Geçirimsiz yüzey alanları	0,585746	3,347505	0,657222	0,081249	1,2762
	Diğer alanlar	-0,66041	0,585745	0,15393	0,313119	
NISI	Geçirimsiz yüzey alanları	0,371381	0,782631	0,410929	0,030759	1,3605
	Diğer alanlar	-0,25747	0,37138	0,1509	0,160375	

Çizelge 4'e göre SDI değerleri 1,2548–1,3605 arasında değişmekte olup spektral ayırım ölçeğine göre (Bouhennache vd., 2019) tüm indeksler için sınıfların spektral ayırımı “iyi” olarak değerlendirilebilir. Ancak, SDI değerleri incelendiğinde UI, NDBI, IBI ve CBCI'nin kısmen birbirine yakın sonuçlar verdiği NISI indeksinin ise diğer dört indeksten önemli bir farkla yüksek değer aldığı görülmektedir. SDI değerinin yüksek olması yüksel spektral ayrılabilirlikle sınıflandırma performansının iyi olduğu anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada SDI değerlerinin yanı sıra hata matrisi (Çizelge 5) oluşturularak sınıflandırma sonucunun referans verilerle karşılaştırılmasıyla indekslerin performans değerlendirmesi daha ayrıntılı ele alınmıştır.

Çizelge 5. Hata matrisi

UI		Geçirimsiz yüzey alanları	Diğer alanlar	
	Geçirimsiz yüzey alanları	140	6	KD = 0,9589
	Diğer alanlar	85	158	KD = 0,6502
		ÜD = 0,6222	ÜD = 0,9634	
				GD = % 76,61 $\chi = 0,5497$
NDBI		Geçirimsiz yüzey alanları	Diğer alanlar	
	Geçirimsiz yüzey alanları	76	35	KD = 0,6847
	Diğer alanlar	149	129	KD = 0,4640
		ÜD = 0,3378	ÜD = 0,7866	
				GD = % 52,70 $\chi = 0,1137$
IBI		Geçirimsiz yüzey alanları	Diğer alanlar	
	Geçirimsiz yüzey alanları	82	39	KD = 0,6777
	Diğer alanlar	143	125	KD = 0,4664
		ÜD = 0,3644	ÜD = 0,7622	
				GD = % 53,21 $\chi = 0,1166$
CBCI		Geçirimsiz yüzey alanları	Diğer alanlar	
	Geçirimsiz yüzey alanları	102	14	KD = 0,8793
	Diğer alanlar	123	150	KD = 0,5494
		ÜD = 0,4533	ÜD = 0,9146	
				GD = % 64,78 $\chi = 0,3376$
NISI		Geçirimsiz yüzey alanları	Diğer alanlar	
	Geçirimsiz yüzey alanları	186	3	KD = 0,9841
	Diğer alanlar	39	161	KD = 0,8050
		ÜD = 0,8267	ÜD = 0,9817	
				GD = % 89,20 $\chi = 0,7850$

ÜD: Üretici doğruluğu, KD: Kullanıcı doğruluğu, GD: Genel doğruluk, χ : kappa

Çizelge 6. NISI indeks sonucuna göre mahallelerin geçirimsiz yüzey alanları

Mahalle	Geçirimsiz yüzey alanları (km ²)	Diğer alanlar (km ²)	Geçirimsiz yüzey alanı yüzdesi (%)
Aksu	0,3214	11,1221	2,81
Alanlı	0,473	6,24	7,05
Atatepe	0,1011	1,2147	7,68
Balaç	0,2108	1,5325	12,09
Beypınar	0,146	1,1961	10,88
Büyükkolpınar	0,2224	1,6228	12,05
Büyükoyunca	0,4347	6,7767	6,03
Camii	0,2139	6,6869	3,10
Cumhuriyet	0,7755	0,7082	52,27
Çakırlar	0,0598	2,8931	2,03
Çakırlar Yalı	0,2672	3,1165	7,90
Çobanlı	0,0823	0,6676	10,97
Çobanözü	0,5217	2,3129	18,40
Denizevleri	0,3583	0,4237	45,82
Esenevler	0,5658	0,9184	38,12
Güzelyalı	0,4295	0,2959	59,21
Güzelyurt	0,1967	6,3133	3,02
İncesu	0,2268	6,3923	3,43
İncesu Yalı	0,4244	1,8502	18,66
İstiklal	0,4525	1,0942	29,26
Kamalı	0,2694	8,4615	3,09
Körfez	1,4826	4,8916	23,26
Küçükolpınar	0,2601	0,7363	26,10
Mevlana	0,5004	1,0305	32,69
Mimarsinan	0,7648	0,8379	47,72
Taflan Merkez	0,0856	4,4949	1,87
Yalı	0,1301	1,5788	7,61
Yenimahalle	1,7511	1,9013	47,94
Yeşildere	0,2008	1,1807	14,53
Yeşilyurt	0,2236	6,94	3,12
Toplam alan	1215,23	9543,16	11,30

5. Tartışma

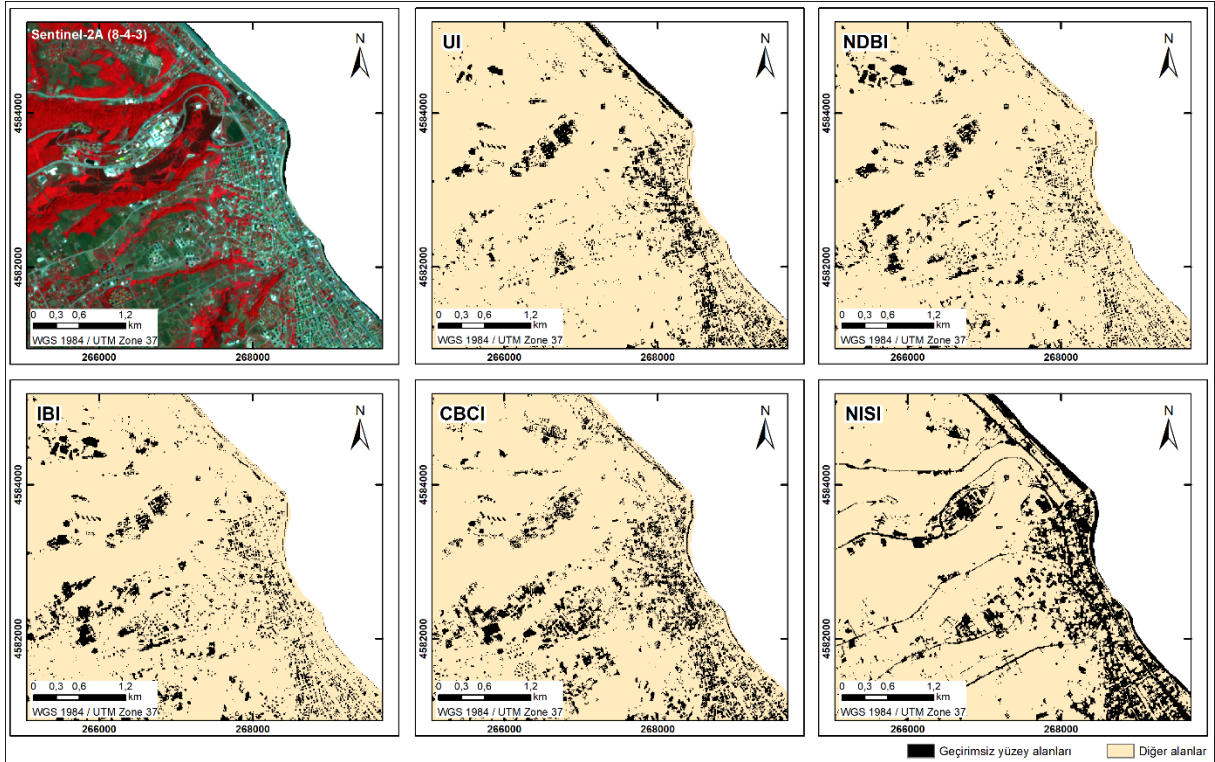
Kentleşmeyle birlikte doğal yüzeyler büyük bir hızla yapay geçirimsiz yüzeylere dönüşmektedir. Bu nedenle, kentsel alanlarda ekolojik dengeyi korumak için geçirimsiz yüzey alanlarına odaklanılması gerekmektedir (Kaur ve Pandey, 2022). Uydu verileri, geçirimsiz yüzey alanlarının hızlı ve maliyet etkin bir şekilde belirlenmesini kolaylaştırır. Ancak uydu görüntülerinden geçirimsiz yüzey çıkarımı, diğer arazi örtüsü özelliklerinin çıkarımına göre daha zor bir işlem olarak kalmıştır (Santra vd. 2020). Araştırmalar spektral indekslerin uygulama kolaylığı ve hesaplama verimliliği nedeniyle diğer yöntemlere göre etkili bir alternatif olarak tercih edildiğini göstermektedir

(Fan vd., 2015; Ghosh vd., 2018; Luo vd., 2017; Tian vd., 2018). Bununla birlikte literatürde çok sayıda spektral indeks tanımlanmış olup araştırmalar spektral indekslerin farklı performanslar sergileyebileceğini ve her alanda, her uydu görüntüsünde, her zaman en yüksek doğruluğu gösterebilecek bir indeks bulunmadığını, sonuçların çalışma alanının ve uydu görüntülerinin özelliklerine göre değişebileceğini göstermiştir (Chen vd., 2020; Hidayati ve Suharyadi, 2019; Kebede vd., 2022; Li vd., 2021).

Analiz sonuçları, literatür ile uyumlu olarak çalışma alanında beş algoritmanın performanslarının farklılık gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. NISI ve UI indeks sonuçları performans olarak yeterli kabul edilebilirken NDBI, IBI ve CBCI indeks sonuçlarının çalışma alanında geçirimsiz yüzeylerin çıkarılmasında başarısız sonuç verdiği görülmüştür. Araştırmalar otopark, havaalanı gibi yüksek albedo geçirimsiz yüzeylerin kum ile; asfalt yol gibi düşük albedo geçirimsiz yüzeylerin nemli toprak ile benzer spektral özellikler göstererek geçirimsiz yüzey çıkarımını zorlaştırdığını göstermektedir (Sun vd., 2011; Su vd., 2022; Wang vd., 2015). Bu çalışmada da geçirimsiz yüzey alanlarını haritalama sürecinde, her indeks çıplak toprak bilgisinden etkilenmiştir. Toprağın yüksek spektral varyasyon özellikleri, kumun yüksek albedo geçirimsiz yüzeylere yakın spektral özellikleri ve nemli toprağın düşük albedo geçirimsiz yüzeylere yakın spektral özellikleri nedeniyle, kentsel geçirimsiz yüzeylerden toprağın ayırt edilmesi zor olmuştur. Bu durumdan en çok NDBI ve IBI indeksleri etkilenirken, en az etkilenen NISI indeksi olmuştur. Çalışma alanında NDBI indeksinin en düşük doğruluğu gösterdiği görülmüştür. Bu durum çıplak toprak alanlarının, spektral yansıtımlarının NIR ve SWIR1 bantlarında benzer yansıtım göstererek geçirimsiz yüzey çıkarımında zayıflığa neden olduğunu ortaya koymaktadır. UI indeksi ile SWIR1 yerine SWIR2 bandının kullanılmasının çıplak toprağın etkilerini azalttığı ve daha iyi performans sağladığı tespit edilmiştir. IBI indeksi SAVI, MNDWI ve NDBI algoritmalarını birleştirerek geçirimsiz yüzey çıkarımı için NDBI algoritmasını geliştirmiştir ve NDBI indeksinden kısmen daha iyi sonuç vermiştir. Ancak yine de doğruluk açısından yetersiz kalmıştır. CBCI, MBSI ve OSAVI algoritmalarını birleştirerek geçirimsiz yüzey alanlarını NDBI ve IBI indeksinden daha iyi vurgulamıştır. NDBI ve IBI indeksleri kadar olmasa da çıplak topraktan büyük ölçüde etkilenmiş ve doğruluk açısından yeterli başarıyı göstermemiştir. CBCI indeksinde MBSI çıplak toprak bilgisine güçlü bir yanıt vermiş ve geçirimsiz yüzey çıkarımında kaçınılmaz olarak büyük miktarda çıplak toprak alanı hatalı şekilde geçirimsiz yüzey olarak sınıflandırılmıştır. UI ve CBCI indekslerinin bina çıkarımı iyi olsa da özellikle CBCI için yolların çıkarımı yetersiz olmuştur. Bununla birlikte, seyrek bitki örtüsünün spektral özellikleri, düşük-albedo geçirimsiz yüzeylere müdahale ederek, geçirimsiz yüzey alanının fazla tahmin edilmesine neden olmuştur. Ayrıca Sentinel-2 uydu görüntülerinin mavi, yeşil, kırmızı, yakın kızılötesi bantlar için piksel boyutu 10 m, birinci ve ikinci kısa dalga kızılötesi bantlarda piksel boyutu 20 m olduğundan kentsel alanlardaki karışık piksel sorunu da sonuçlar üzerinde olumsuz etki yaratmıştır. Tüm etkilere rağmen % 89,20 genel doğruluk ve 0,7850 kappa değeriyle NISI indeksi çalışma alanında çok başarılı performans göstermiş ve diğer geçirimsiz yüzey indekslerinden daha iyi uygulanabilirlik sağlamıştır. NISI ile binaların yanı sıra yollar da net olarak çıkarılabilmektedir. Şekil 7'de çalışma alanının küçük bir kesitinde indeks sonuçları görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde NISI indeksinin etkin performans gösterdiği

anlaşılmaktadır. Bununla birlikte en az etki NISI sonucunda olsa da bazı çıplak toprak alanlarının geçirimsiz yüzey olarak hatalı sınıflandırılabilirdiği görülmektedir.

NISI indeksi geçirimsiz yüzey çıkarımında diğer indekslerden daha başarılı sonuç verse de indekslerin genel performansı ile ilgili değerlendirme yapabilmek için farklı çalışma alanlarında ve farklı uydu görüntülerinde uygulanarak daha fazla sonucun karşılaştırılmasına gerek duyulmaktadır. Ayrıca geçirimsiz yüzeylerin çıplak toprak ile spektral benzerliği nedeniyle ortaya çıkan sorunların çözülmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Çıplak toprağın ayrı değerlendirilmesi ve çalışma alanında maskelenmesi geçirimsiz yüzey çıkarım başarısını artırabilir. Bu kapsamda çıplak toprak yüzeylerinin çıkarımıyla ilgilenen indeksler yayınlanmıştır (Deng vd., 2015; Liu, vd., 2022; Nguyen, 2021). Bu indekslerin geçirimsiz yüzey indekslerine entegre edilmesi doğruluğun artırılmasında umut verici olabilir.



Şekil 7. İndeks sonuçlarının karşılaştırılması

6. Sonuç ve Öneriler

Günümüzde hızlı kentleşmeyle birlikte geçirimsiz yüzeylerin de hızla artması çeşitli çevresel ve ekolojik sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesi ve değişimlerin takibi ile kentsel yapılaşma süreçlerinde çevresel ve ekolojik yönden uyumlu inşaya özen gösterilmesi önemlidir. Günümüzde geçirimsiz yüzeylerin uzaktan algılama teknolojisiyle hızlı ve uygun maliyetli olarak belirlenmesi için çeşitli yöntemler önerilmiş ve uygulanmıştır. Spektral indeksler uydu görüntülerinden geçirimsiz yüzey çıkarımında en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilse de çalışma alanına göre farklı indekslerin farklı performanslar göstermesi indeks seçimi açısından zorluk yaratmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'nin en hızlı kentleşme yaşanan ilçelerinden biri olan Atakum'da 2022 yılı için geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesinde Sentinel-2 görüntüleri kullanılarak beş geçirimsiz yüzey indeksi algoritmasının verimliliği analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, NISI indeksinin UI, NDBI, IBI ve CBCI indekslerinden daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. NISI indeksine göre Atakum'da incelenen 30 mahallenin 5'inde geçirimsiz yüzey alanları % 40'ın üzerinde ve 2'sinde %30–40 aralığındadır. Elde edilen bulgular şehir planlama ve çevre araştırmaları açısından geçirimsiz yüzey etkilerinin değerlendirilmesinde önem taşımaktadır.

Çalışmanın sonuçları bir çalışma alanında farklı indekslerin değerlendirmeye alınarak en doğru sonuç veren indeks sonuçlarının kullanılmasıyla geçirimsiz yüzey çıkarım doğruluğunun artırılabilirliğini ortaya çıkarmıştır. Çalışma ayrıca açık veri kaynağı olan Sentinel-2 uydu görüntülerinin spektral indeksler kullanılarak geçirimsiz yüzeylerin belirlenmesindeki potansiyelini de göstermiştir.

Sonuç olarak, Sentinel-2 uydu görüntülerinden farklı indekslere dayalı geçirimsiz yüzey çıkarımının başarıyla uygulanabileceği ve umut verici olduğu görülmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde açık veri uydu görüntülerinin kullanımı, geçirimsiz yüzey alanlarının düşük maliyetlerle ve hızlı bir şekilde haritalanması için önemli olanaklar sağlamaktadır. Bu kapsamda Sentinel-2 görüntülerinin yanı sıra Landsat ve Rasat gibi diğer açık veri uydu görüntüleri önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Özellikle termal kızılötesi bant içeren Landsat görüntülerinde termal kızılötesi bantlara dayalı geçirimsiz yüzey indeksleri uygulanarak diğer indekslerle entegrasyonu sağlanabilir. Ayrıca daha yüksek çözünürlüklü görüntülerin açık ve ücretsiz veri olarak temin edilebilmesi veya daha düşük maliyetlerle elde edilebilmesi durumunda karışık piksel problemi azaltılarak uzaktan algılamanın daha etkin kullanılması mümkün olacaktır. Bu nedenle, Sentinel-2 ve diğer uydu görüntülerini kullanarak farklı geçirimsiz yüzey indekslerinin etkinliğini ve farklı çalışma alanlarında uygulanabilirliğini sistematik ve kapsamlı bir şekilde analiz etmek gereklidir.



Extraction of Urban Impervious Surface Areas in Samsun-Atakum Using Spectral Indices from Sentinel-2 Satellite Images

Derya Öztürk*^a

Submitted: 21.08.2022

Accepted: 07.11.2022

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

An impervious surface is defined as a surface that prohibits water penetration into the underlying ground. Impervious surfaces are mainly associated with anthropogenic land surface features such as transportation (streets, highways, parking lots, pavements) and buildings (Bauer et al., 2007; Slonecker et al., 2001). Determination of impervious surfaces and change detection is crucial for understanding urban land use/cover changes, evaluating urban growth, and investigating environmental problems caused by the increase of impervious surfaces (Ansari et al., 2016; Carlson, 2007; Chen et al., 2019; Du et al., 2015; Li et al., 2011; Liu et al., 2013; McClung and Ibáñez, 2018; Sekertekin and Zadbagher, 2021; Su et al., 2022; Weng, 2012).

It is essential to use an effective technique in terms of cost and labor to determine impervious surfaces. It becomes even more critical for multiple geographical and large study areas (Shrestha et al., 2021). Today, remote sensing is important in impervious surface extraction, especially in large areas (Kaur and Pandey, 2022; Parekh et al., 2021). The main methods for mapping impervious surfaces from satellite images are decision tree models, regression models, image classification techniques, and spectral indices (Chen et al., 2019; Lu et al., 2014). Spectral indices have been widely used due to their easy application, and many impervious surface indices have been developed (Chen et al., 2019; Deng and Wu, 2012; Kaur and Pandey, 2022; Sun et al., 2016; Xu, 2008; Zha et al., 2003; Zhang et al., 2018). However, there are some difficulties in extracting impervious surfaces from remote sensing data because of the spectral heterogeneity of impervious surfaces and the complex spatial pattern of the urban landscape (Lu et al., 2011; Wang, 2015). Several studies have revealed that bare soil can be misinterpreted (especially regarding NIR and SWIR1 values) by showing similar reflectance to impervious surfaces (Chen et al., 2019; Sun et al., 2011). In addition, there may also be high spectral variation in a land cover class. Moreover, mixed pixels, which increase with the increase in pixel dimension, also pose significant problems due to the heterogeneity of urban areas (Lu and Weng, 2004; Wang, 2015). On the other hand, accuracy and efficiency can be greatly improved by using different

* Corresponding Author: dozturk@omu.edu.tr

^a Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0002-0684-3127>

algorithms in impervious surface extraction. The performance of an algorithm depends on the field of study; therefore, it is important to compare different algorithms in a study area (Chen et al., 2020).

This study aims to analyze the performance of five 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) and normalized impervious surface index (NISI) in mapping impervious surface areas from 2022 Sentinel-2A satellite image in Atakum district of Samsun.

2. Study Area

Atakum district of Samsun province is located between $35^{\circ}58'45''$ – $36^{\circ}19'00''$ east longitudes and $41^{\circ}13'30''$ – $41^{\circ}26'45''$ northern latitudes. Atakum's annual average growth rate is approximately 63.5‰ and is among the districts with the highest population growth in Turkey (Öztürk, 2015, 2017). Atakum's population reached 238702 as of 2021 (Turkish Statistical Institute, 2022).

This study focused on 30 neighborhoods with the highest population growth, urbanization potential, and urban development among the 56 neighborhoods of Atakum, covering 97% of Atakum's population and an area of 107.72 km².

3. Methodology

In the study area, impervious surfaces for the year 2022 were determined using five spectral impervious surface indices (UI, NDBI, IBI, CBCI, and NISI) from Sentinel-2A satellite images. All indices were performed in Geographic Information Systems (GIS) environment using ArcGIS 10.0 software.

3.1. Data and Preprocessing

In this study, Sentinel-2A Level-1C data of 07.07.2022, obtained free of charge from the US Geological Survey (USGS) website, was used. Sen2Cor (European Space Agency, 2022) was used for atmospheric correction.

3.2. Extraction of Impervious Surfaces Using Spectral Indices

Impervious surface indices effectively provide impervious surface information from satellite images using various algorithms (Chen et al., 2020). This study used UI, NDBI, IBI, CBCI, and NISI indices to extract impervious surfaces. Calculation of UI (Kawamura et al., 1996), NDBI (Zha et al., 2003), IBI (Xu, 2008), CBCI (Zhang et al., 2018), and NISI (Su et al., 2022) are given in Equations 1–5. ρ_{Blue} , ρ_{Green} , ρ_{Red} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} , and ρ_{SWIR2} in the indices are the surface reflectance values of the blue, green, red, near-infrared, first shortwave-infrared and second shortwave-infrared bands, respectively. In Eq.3, SAVI is the soil-adjusted vegetation index and MNDWI is the modified normalized difference water index. In calculating the IBI, NDBI, SAVI, and MNDWI values should be normalized to the 0–1 range (Xu, 2008). In Eq.4, MBSI is the modified bare soil index, and OSAVI is the optimized soil-adjusted vegetation index. A is the correction factor and was taken as 0.5 in this study.

$$UI = \frac{\rho_{SWIR2} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR2} + \rho_{NIR}} \quad (1)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

$$IBI = \frac{NDBI - (SAVI + MNDWI)/2}{NDBI + (SAVI + MNDWI)/2} \quad (3)$$

$$CBCI = (A + 1) * MBSI - OSAVI + A \quad (4)$$

$$NISI = \frac{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) - \rho_{NIR}}{(\rho_{Blue} + \rho_{Green} + \rho_{Red}) + \rho_{NIR}} \quad (5)$$

3.3. Thresholding

In order to select the optimum threshold value for each index in the study area, manual thresholding (Chen et al., 2019; Li et al., 2021; Lu et al., 2010; Su et al., 2022) approach was used by utilizing known pixels.

3.4. Performance Evaluation

In this study, spectral discrimination index - SDI (Eq.6) (Kebede et al., 2022) and error matrix (Navulur, 2006) approaches were applied for the performance evaluation of impervious surface index results.

$$SDI = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (6)$$

If $SDI < 1$, the spectral discrimination is “poor” because the classes overlap spectrally, “good” if $1 \leq SDI < 3$, and “very good” if $SDI \geq 3$ (Bouhennache et al., 2019). Producer’s accuracy, user’s accuracy, overall accuracy, and kappa values were calculated by selecting 225 points for impervious surface areas and 164 points for other areas from high-resolution images through Google Earth Pro to create the error matrix. The agreement between classified and reference data is strong (excellent) if the kappa value is greater than 0.8, significant between 0.6–0.8, and moderate between 0.4–0.6. If the value is less than 0.4, there is a poor agreement (Zheng et al., 2015).

4. Results

4.1. Impervious Surface Index Results

The UI, NDBI, IBI, CBCI, and NISI results are shown in Figure 1. For each index, high values indicate high imperviousness, while low values indicate low imperviousness. Two-class images were created as impervious surface areas and other areas by applying threshold values. Impervious surfaces include artificial surfaces such as roads, pavements, buildings, and parking lots, while other areas include natural surfaces such as bare soil, forest, and grasslands.

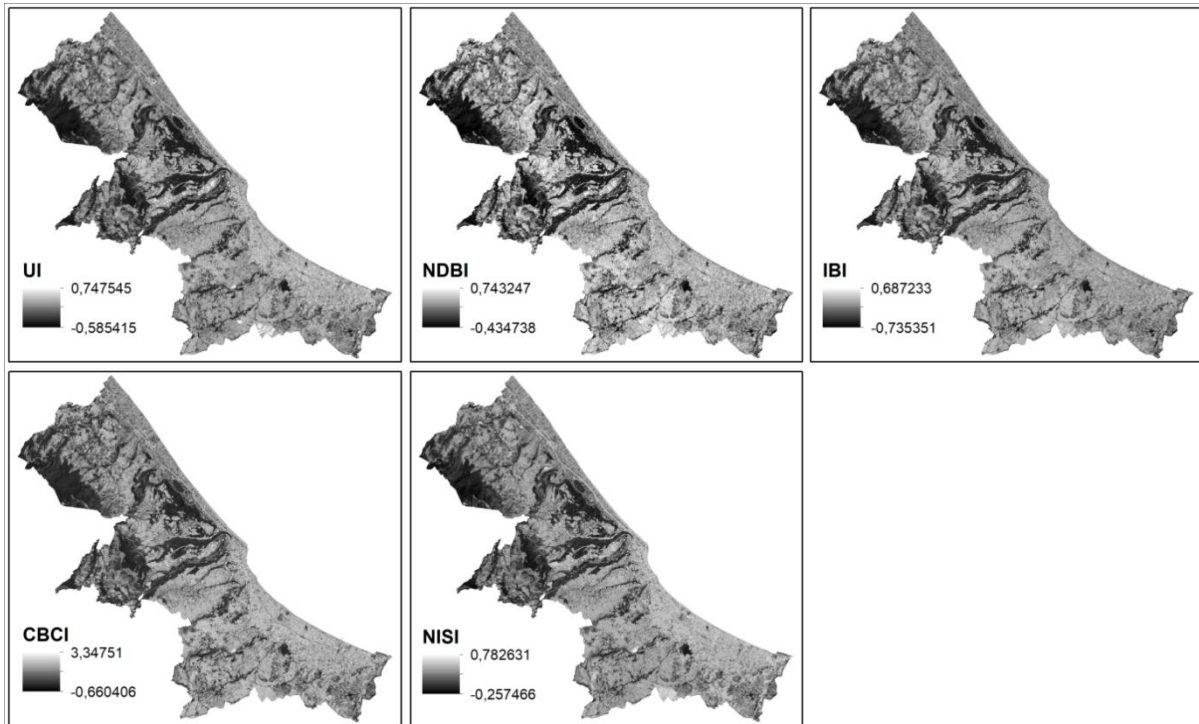


Figure 1. Index results

4.2. Evaluation of Index Performances

SDI values range from 1.2548 to 1.3605; therefore, according to the spectral discrimination scale (Bouhennache et al., 2019), the spectral discrimination of the classes can be considered “good” for all indices. However, the SDI value for NISI was higher than other indices.

In this study, the performance evaluation of the indices was discussed in more detail by comparing the classification result with the reference data by creating an error matrix in addition to the SDI values. It was seen that the highest accuracy using the error matrix was obtained from NISI. For impervious surface areas, the producer’s accuracy is 0.8267 and the user’s accuracy is 0.9841. The overall accuracy is 89.20%, and the kappa value is 0.7850. The second-highest accuracy after the NISI was obtained from UI. The index with the lowest accuracy was NDBI.

4.3. Impervious Surface Areas by Optimum Index Results

NISI was the best-performing index with both the highest SDI and the highest overall accuracy and kappa values. Accordingly, NISI results and neighborhood boundaries were overlapped in the GIS environment, and an impervious surface area map was created for Samsun-Atakum (Figure 2), and the area and areal percentages of the impervious surface areas were calculated on the basis of neighborhoods (Table 1). The percentages of impervious surface areas in the 30 neighborhoods vary between 2.03–59.21%. The neighborhood with the highest percentage of impervious surface area was Güzelyalı, while the lowest percentage of impervious surface area was determined in Aksu.

Çakırlar Yalı	0,2672	3,1165	7,90
Çobanlı	0,0823	0,6676	10,97
Çobanözü	0,5217	2,3129	18,40
Denizevleri	0,3583	0,4237	45,82
Esenevler	0,5658	0,9184	38,12
Güzelyalı	0,4295	0,2959	59,21
Güzelyurt	0,1967	6,3133	3,02
İncesu	0,2268	6,3923	3,43
İncesu Yalı	0,4244	1,8502	18,66
İstiklal	0,4525	1,0942	29,26
Kamalı	0,2694	8,4615	3,09
Körfez	1,4826	4,8916	23,26
Küçükkolpınar	0,2601	0,7363	26,10
Mevlana	0,5004	1,0305	32,69
Mimarsinan	0,7648	0,8379	47,72
Taflan Merkez	0,0856	4,4949	1,87
Yalı	0,1301	1,5788	7,61
Yenimahalle	1,7511	1,9013	47,94
Yeşildere	0,2008	1,1807	14,53
Yeşilyurt	0,2236	6,94	3,12
Whole of area	1215,23	9543,16	11,30

5. Discussion

Many spectral indices have been defined in the literature. Studies have shown that spectral indices can exhibit different performances. No index can always show the highest accuracy, and the results may vary according to the characteristics of the study area and satellite images (Chen et al., 2020; Hidayati and Suharyadi, 2019; Kebede et al., 2022; Li et al., 2021). In this study, the analysis results revealed that the performances of the five algorithms differed in the study area, consistent with the literature. While the NISI and UI results can be considered sufficient in terms of performance, NDBI, IBI, and CBCI results failed to extract impervious surfaces in the study area. Several studies have revealed that high albedo impervious surfaces such as parking lots and airports have similar spectral properties to sand, and low albedo impervious surfaces such as asphalt roads have similar spectral properties to moist soil, and therefore impervious surface extraction becomes difficult (Sun et al., 2011; Su et al., 2022; Wang et al., 2015). In this study, each index was affected by bare soil in the mapping process of impervious surface areas. Due to the soil's high spectral variation properties, the properties of sand similar to high albedo impervious surfaces, and the properties of moist soil similar to low albedo impervious surfaces, it has been challenging to distinguish soil from urban impervious surfaces. While NDBI and IBI were most affected by this situation, NISI was the least affected. With an overall accuracy of 89.20% and a kappa value of 0.7850, NISI performed well in the study area and provided better applicability than other indices. With NISI, roads were clearly extracted as well as buildings.

6. Conclusions

The increase in impervious surfaces due to rapid urbanization causes many environmental and ecological problems. For this reason, it is important to determine the impervious surfaces, monitor the changes, and make environmentally and ecologically compatible constructions in urbanization. Various methods have been proposed for determining impervious surfaces using remote sensing technology. Although spectral indices are considered one of the most effective methods in extracting impervious surfaces from satellite images, the varying performance of indices in different study areas makes index selection difficult.

In this study, the efficiencies of the five impervious surface indices were analyzed using Sentinel-2A for 2022 in Atakum, one of the districts with the fastest urbanization in Turkey. Analysis results showed that NISI outperformed UI, NDBI, IBI, and CBCI. According to the NISI, impervious surface areas are over 40% in 5 of the 30 neighborhoods. The findings are important for city planners and environmental researchers to evaluate the impervious surface effects.

The study's results revealed that the accuracy of impervious surface extraction could be increased by using the most accurate index results by evaluating different indices in a study area. The study also demonstrated the potential of Sentinel-2 satellite images, an open data source, in identifying impervious surfaces using spectral indices.

Referanslar/References

- Ansari, T. A., Katpatal, Y. B., Vasudeo, A. D. (2016). Spatial evaluation of impacts of increase in impervious surface area on SCS-CN and runoff in Nagpur urban watersheds, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (18), 1–15. doi:10.1007/s12517-016-2702-5
- Arnold Jr, C. L., Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American planning Association*, 62 (2), 243–258. doi:10.1080/01944369608975688
- Atakum Belediyesi (2014). *Atakum Belediyesi 2015–2019 Stratejik Planı*. Samsun.
- Atakum Kaymakamlığı (2013). *Değişirken Gelişen Atakum*. Samsun.
- Batra, U., Roy, N. R., Panda, B. (Ed.) (2020). *Data science and analytics: 5th international conference on recent developments in science, engineering and technology, REDSET 2019*, Gurugram, India, November 15–16, 2019, Revised Selected Papers, Part II.
- Bauer, M. E., Loffelholz, B. C., Wilson, B. (2007). Estimating and mapping impervious surface area by regression analysis of Landsat imagery. *Remote Sensing of Impervious Surfaces* içinde (31–48). CRC Press.
- 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:10.1080/10106049.2018.1497094
- Carlson, T. N. (2007). Impervious surface area and its effect on water abundance and water quality. *Remote Sensing of Impervious Surfaces* içinde (381–396). CRC Press.
- 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: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:10.1117/1.JRS.13.016502
- Congalton, R. G., Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. CRC Press.
- 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:10.1007/s11356-020-11007-4
- Deng, C. B., Wu, C. S. (2012). BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments. *Remote Sensing of Environment*, 127, 247–259. doi:10.1016/j.rse.2012.09.009
- 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:10.1016/j.jag.2015.02.010
- Du, S., Shi, P., Van Rompaey, A., Wen, J. (2015). Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas. *Natural Hazards*, 76 (3), 1457–1471. doi:10.1007/s11069-014-1463-2
- Earth Resources Observation and Science Center (2022). *USGS EROS Archive- Sentinel-2*, 16.07.2022 tarihinde https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects adresinden alındı.
- Ertan, K. (2019). Kentsel yaşam kalitesi ve ütopiyalar. *Kent ve Çevre Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 83–103. <https://dergipark.org.tr/pub/yykentcevre/issue/50632/643324> adresinden alındı.
- European Space Agency (2022a). *Sentinel Level-1*, 15.07.2022 tarihinde <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1> adresinden alındı.
- European Space Agency (2022b). *Copernicus Sentinel-2 Collection 1 MSI Level-1C (L1C)*, 15.07.2022 tarihinde <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access/sentinel-products/sentinel-2-data-products/collection-1-level-1c> adresinden alındı.
- European Space Agency (2022c). *Sen2Cor*, 20.07.2022 tarihinde <https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/> adresinden alındı.
- 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:10.1080/07038992.2015.1112730
- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1), 185–201. doi:10.1016/S0034-4257(01)00295-4
- Ghosh, D. K., Mandal, A. C., Majumder, R., Patra, P., Bhunia, G. S. (2018). Analysis for mapping of built-up area using remotely sensed indices—a case study of Rajarhat Block in Barasat Sadar Sub-Division in West Bengal (India). *Journal of Landscape Ecology*, 11 (2), 67–76. doi:10.2478/jlecol-2018-0007
- Hidayati, I. N., Suharyadi, R. (2019). A Comparative Study of various Indices for extraction urban impervious surface of Landsat 8 OLI. *Forum Geografi*, 33 (2), 162–172.
- 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: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., Suryabagavan, 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:10.1016/j.envc.2022.100568
- Li, C., Shao, Z., Zhang, L., Huang, X., Zhang, M. (2021). A comparative analysis of index-based methods for impervious surface mapping using multiseasonal sentinel-2 satellite data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 3682–3694. doi:10.1109/JSTARS.2021.3067325
- Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., Wu, J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 115 (12), 3249–3263. doi:10.1016/j.rse.2011.07.008
- Li, L., Lu, D., Kuang, W. (2016). Examining urban impervious surface distribution and its dynamic change in Hangzhou metropolis. *Remote Sensing*, 8 (3), 265. doi:10.3390/rs8030265
- 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:10.1016/j.catena.2022.106265
- Liu, Z., Wang, Y., Li, Z., Peng, J. (2013). Impervious surface impact on water quality in the process of rapid urbanization in Shenzhen, China. *Environmental Earth Sciences*, 68 (8), 2365–2373. doi:10.1007/s12665-012-1918-2
- Lu, D., Hetrick, S., Moran, E., Li, G. (2010). Detection of urban expansion in an urban-rural landscape with multitemporal

- QuickBird images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4 (1), 041880. doi:10.1117/1.3501124
- Lu, D., Li, G., Kuang, W., Moran, E. (2014). Methods to extract impervious surface areas from satellite images. *International Journal of Digital Earth*, 7 (2), 93–112. doi:10.1080/17538947.2013.866173
- Lu, D., Moran, E., Hetrick, S. (2011). Detection of impervious surface change with multitemporal Landsat images in an urban–rural frontier. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (3), 298–306. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.10.010
- Lu, D., Weng, Q. (2004). Spectral mixture analysis of the urban landscape in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70 (9), 1053–1062. doi:10.14358/PERS.70.9.1053
- Luo, X., Peng, Y., Gao, Y. (2017). An improved optimal segmentation threshold algorithm and its application in the built-up quick mapping. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45 (6), 953–964. doi:10.1007/s12524-016-0656-4
- 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.
- McClung, T., Ibáñez, I. (2018). Quantifying the synergistic effects of impervious surface and drought on radial tree growth. *Urban Ecosystems*, 21 (1), 147–155. doi:10.1007/s11252-017-0699-5
- Navulur, K. (2006). *Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm*. 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:10.3390/land10030231
- Öztürk, D. (2015). Urban growth simulation of Atakum (Samsun, Turkey) using cellular automata-Markov chain and multi-layer perceptron-Markov chain models. *Remote Sensing*, 7 (5), 5918–5950. doi:10.3390/rs70505918
- Öztürk, D. (2017). 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:10.3846/16486897.2016.1233881
- Parekh, J. R., Poortinga, A., Bhandari, B., Mayer, T., Saah, D., Chishtie, F. (2021). Automatic detection of impervious surfaces from remotely sensed data using deep learning. *Remote Sensing*, 13 (16), 3166. doi:10.3390/rs13163166
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use/cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management*, 7 (2), 70–84. doi:10.1016/j.jum.2018.04.006
- Santra, A., Mitra, S. S., Sinha, S., Routh, S. (2020). Performance testing of selected spectral indices in automated extraction of impervious built-up surface features using Resourcesat LISS-III image. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (22), 1–11. doi:10.1007/s12517-020-06183-z
- Sekertekin, A., Zadbagher, E. (2021). Simulation of future land surface temperature distribution and evaluating surface urban heat island based on impervious surface area. *Ecological Indicators*, 122, 107230. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107230
- 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:10.3390/rs13153040
- Slonecker, E. T., Jennings, D. B., Garofalo, D. (2001). Remote sensing of impervious surfaces: A review. *Remote Sensing Reviews*, 20 (3), 227–255. doi:10.1080/02757250109532436
- 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:10.3390/rs14143391
- Sun, G., Chen, X., Jia, X., Yao, Y., Wang, Z. (2016). Combinational build-up index (CBI) for effective impervious surface mapping in urban areas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9 (5), 2081–2092. doi:10.1109/jstars.2015.2478914
- 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:10.1117/1.3539767
- Tian, Y., Chen, H., Song, Q., Zheng, K. (2018). A novel index for impervious surface area mapping: Development and validation. *Remote Sensing*, 10 (10), 1521. doi:10.3390/rs10101521
- Türkiye İstatistik Kurumu (2022). *İstatistik Veri Portalı: Nüfus ve Demografi*, 09.09.2022 tarihinde <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Nufus-ve-Demografi-109> adresinden alındı.

-
- United Nations (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*, United Nations Publication.
- Valdiviezo-N, J. C., Téllez-Quiñones, A., Salazar-Garibay, A., López-Caloca, A. A. (2018). Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion. *JOSA A*, 35 (1), 35–44. doi:10.1364/JOSAA.35.000035
- 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: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:10.1016/j.rse.2011.02.030
- 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:10.1080/01431160802039957
- 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:10.1080/01431160304987
- 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:10.1109/ACCESS.2018.2857405
- Zheng, H. W., Shen, G. Q., Wang, H., Hong, J. (2015). Simulating land use change in urban renewal areas: A case study in Hong Kong. *Habitat International*, 46, 23–34. doi:10.1016/j.habitatint.2014.10.008