



CYGNSS toprak nemi verilerinin SMAP uydusu ve ISMN istasyonları ile karşılaştırmalı analizi

Muhammed Raşit Çevikalp ^{*1}, Mustafa Serkan Işık ¹, Mehmet Furkan Çelik ², Nebiye Musaoğlu ¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, cevikalpm@itu.edu.tr, isikm@itu.edu.tr, musaoglune@itu.edu.tr

² University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, m.f.celik@utwente.nl

Kaynak Göster: Çevikalp, M. R., Işık, M. S., Çelik, M. F., & Musaoğlu, N. (2024). CYGNSS toprak nemi verilerinin SMAP uydusu ve ISMN istasyonları ile karşılaştırmalı analizi. *Geomatik*, 9 (2), 227-237

<https://doi.org/10.29128/geomatik.1424069>

Anahtar Kelimeler

Uzaktan algılama
GNSS-R
CYGNSS
Toprak nemi
CONUS

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.01.2024
Revize: 08.03.2024
Kabul: 11.03.2024
Yayınlanma: 15.08.2024



Öz

Küresel Navigasyon Uydu Sistemi Reflektometrisi (GNSS-R) toprak nem izleme için elverişli bir uzaktan algılama yöntemidir. CYclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) görevi başlangıçta tropikal kasırga ve siklon etkinliklerinin belirlenmesi için tasarlanmış olsa da, toprak neminin yüksek zamansal çözünürlükte izlenebilmesi için değerli veriler sağlamaktadır. Bu çalışmada, Kıtasa Amerika Birleşik Devletleri (CONUS) bölgesinde Uluslararası Toprak Nemi Ağı'na (ISMN) ait yer istasyonlarına ait veriler kullanılarak CYGNSS gözlemlerinden elde edilen toprak nemi değerlerinin doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. CYGNSS misyonunun toprak nemini belirlemedeki performansı, NASA tarafından geliştirilmiş aktif ve pasif radar ölçme sistemi kullanan Soil Moisture Active Passive (SMAP) uydusunun performansı ile karşılaştırılarak verilerin tutarlılıkları incelenmiştir. Ayrıca CYGNSS uydusunun farklı iklim koşulları ve toprak yapısındaki sinyal karakteristiğini incelemek amacıyla, ISMN istasyonlarında elde edilen istatistiksel sonuçlar iklim çeşitliliklerine ve toprak dokusunun değişikliklerine göre sınıflandırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, CYGNSS verileri ile yer istasyonu verileri arasındaki korelasyon $R=0.45$ olarak bulunurken SMAP verileriyle korelasyonu $R=0.67$ olarak hesaplanmıştır. Böylece, uydu tabanlı GNSS-R misyonlarının başlangıcı olan CYGNSS misyonunun küresel ölçekte toprak neminin etkin bir şekilde elde edilebilmesi için değerli bir veri sağladığı görülmüştür.

Comparative analysis of CYGNSS soil moisture data with SMAP satellite and ISMN stations

Keywords

Remote sensing
GNSS-R
CYGNSS
Soil moisture
CONUS

Research Article

Received: 23.01.2024
Revised: 08.03.2024
Accepted: 11.03.2024
Published: 15.08.2024

Abstract

Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) is a remote sensing method that can be used to monitor soil moisture conveniently. Although the original purpose of the CYclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) mission was to determine tropical cyclone and cyclone activity, it provides valuable data for monitoring soil moisture at high temporal resolution. In this study, we tested the accuracy and reliability of soil moisture values obtained from CYGNSS observations using in situ data of the International Soil Moisture Network (ISMN) in the Continental United States (CONUS) region. We compared the performance of the CYGNSS mission in determining soil moisture with that of the Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite, which uses an active and passive radar measurement system developed by NASA, and examined the consistency of the data. Additionally, we classified the statistical results obtained at ISMN stations according to climate classification and soil texture variability to examine the signal characteristics of the CYGNSS satellite under different climatic conditions and soil texture variability. The comparison results showed that the correlation between CYGNSS data and in situ observation was $R = 0.45$, while the correlation with SMAP data was $R = 0.67$. Therefore, it has been demonstrated that the CYGNSS mission, which is the first of satellite-based GNSS-R missions, provides valuable data for effectively obtaining soil moisture on a global scale.

1. Giriş

Küresel ısınmanın sebep olduğu iklim değişikliği ve plansız kullanım nedeniyle su kaynakları seviyesi küresel ölçekte tehlike altındadır. Yersel su döngüsünün önemli bir parçası olan toprak neminin sürekli olarak izlenmesi, hidrolojik süreçlerin takibi ve iklim modelleme çalışmaları için gerekliliğinin yanı sıra tarımsal verimlilik ve etkin bir tarım politikasının geliştirilebilmesi için de önem arz etmektedir. Toprak nemi seviyesi bitkinin gelişme sürecinde yeterli miktarda suya ve besine erişmesinde etkin bir rol oynar. Bu sebeple, tarımsal faaliyetlerde toprak nemi, yağış miktarının yetersiz olduğu durumlarda ve kurak bölgelerde tarımsal su yönetimini düzenleyici bir parametredir.

Dünya'nın farklı bölgelerinde, özellikle tarım alanları, doğal bitki örtüsü, ormanlar ve sulak alanlarda gözlem istasyonları mevcut olup, toprağın farklı derinliklerine yerleştirilen algılayıcılar ile toprak nemi değişimi yüksek zamansal çözünürlük ile takip edilmektedir. Algılayıcılar sayesinde yüksek doğruluk ve güvenilirlikte elde edilen bu ölçmeler tarımsal faaliyetlerde sulama uygulamalarının optimizasyonu ve sulak alanların korunması gibi su kaynaklarının yönetimini gerektiren uygulamalar için önemli olup iklim değişkenleri ile etkileşiminin incelenmesinde kullanılmaktadır (Adeyemi ve ark., 2018; Filipović ve ark., 2022; Li ve ark., 2022). Yer sabit algılayıcılar ile elde edilen toprak nemi ölçmeleri yüksek zamansal çözünürlük, doğruluk ve güvenilirlik sağlamaktadır. Fakat yerel ölçekte çözüm sağlaması nedeniyle bölgesel ve küresel çapta araştırmaların yapılmasında mekânsal çözünürlük açısından yetersiz kalmaktadır (Bünyan Ünel ve ark., 2023). Bu nedenle iklim değişiminin modellenmesi ve su kaynaklarının yönetiminde yersel ölçmelerin kullanımı kısıtlıdır (Orth, 2021).

Uydu tabanlı uzaktan algılama yöntemleri ile yeryüzünün sürekli olarak gözlemlenebilmesi ve yersel ölçmelerin yaratmış olduğu mekânsal kısıtları aşabilecek çözümler sunmasından dolayı toprak nemi belirleme amacıyla uydu misyonları tasarlanmıştır. NASA'nın Toprak Nemi Aktif Pasif (Soil Moisture Active Passive - SMAP) (Entekhabi ve ark., 2010) ve ESA'nın Toprak Nemi ve Okyanus Tuzluluğu (Soil Moisture and Ocean Salinity - SMOS) (Kerr ve ark., 2012) misyonları gibi mikrodalga/radar teknolojisi kullanan uydulardan elde edilen uzaktan algılama verileri, yersel ölçmeler kullanarak toprak nemi tahmininin zorluklarının üstesinden gelmek için etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Yüksek zamansal çözünürlüğe sahip bu mikrodalga uydu misyonları, yersel ölçmelere olan bağımlılığı ortadan kaldıracak çok değerli veriler sağlamaktadır.

Bununla birlikte, son yıllarda önem kazanan Küresel Navigasyon Uydu Sistemi Reflektometri (Global Navigation Satellite System Reflectometry - GNSS-R) toprak nemi değerini elde etmek için etkin bir şekilde kullanılmaya başlayan bir mikrodalga uzaktan algılama tekniği olarak literatürde yerini almaya başlamıştır (Jin ve Komjathy, 2010). Geçmişte görev yapmış olan United Kingdom-Disaster Monitoring Constellation (UK-DMC) (Gleason, 2005) ve TechDemoSat-1 (Unwin ve ark., 2016) uyduları bu teknik ile toprak nemi izleme

konusunda önemli adımların atılmasını sağlamıştır. Aktif olarak yörüngede olan CYclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS)(Ruf ve ark., 2012) ve Fengyun-3E (Yang ve ark., 2022) gibi uydu misyonlarıyla daha kapsamlı veriler elde etmek mümkün olmuştur. Ayrıca 2024 yılında fırlatılması planan Avrupa Uzay Ajansı projesi HydroGNSS (Unwin ve ark., 2021) misyonunun bu alandaki gelişmelere katkı sağlayacağı beklenmektedir.

GNSS-R yönteminde yeryüzünden gerisaçılan radar sinyalinin işlenmesiyle saçılma yüzeyi hakkında jeofiziksel bilgiler modellenmektedir (Yu ve ark., 2022). Geri saçılımın gerçekleştiği yüzey su, buz, çıplak toprak veya bitki olabilmekte ve elde edilen jeofiziksel parametre de yüzeyin yapısına göre değişkenlik göstermektedir. Yersel ölçmelerle birlikte uçak ve uydu tabanlı platformlar da kullanılarak okyanus yüzeyi pürüzlülüğü (Clarizia ve ark., 2008), rüzgar hızı (Asgarimehr ve ark., 2019; Wang ve ark., 2022a), altimetri (Cardellach ve ark., 2014; Rius ve ark., 2012), deniz seviyesi değişimleri (Altuntaş ve Tunaloğlu, 2022) ve biyokütle tahmini (Santi ve ark., 2020) gibi bir çok önemli çalışmada etkili bir araç olarak kullanılmakta olan GNSS-R yöntemi, toprak nemi belirleme amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Arroyo ve ark., 2014; Rodriguez-Alvarez ve ark., 2009).

Uydu tabanlı GNSS-R misyonu olarak Aralık 2016 yılında yörüngeye gönderilen CYGNSS uydu misyonu toprak neminin takibi için çok değerli bir veri kaynağı haline gelmiştir. NASA, Michigan Üniversitesi ve Southwest Araştırma Enstitüsü tarafından başlatılan misyon, tropikal siklonları ve kasırgaları takip etmek amacıyla yörüngeye yerleştirilen 8 mikro uydudan oluşmakta olup ± 38 enlemler arası yarı küresel gözlem alanına sahiptir. Her ne kadar okyanus rüzgarlarını takip etmek amacıyla dizayn edilmiş olsa da CYGNSS'in karalar üzerinde elde ettiği yüksek zamansal bistatik radar verileri toprak neminin hesaplanması için etkin bir şekilde kullanılabilir (Ruf ve ark., 2012). CYGNSS uyduları ile elde edilen verilerle hesaplanan toprak nemi verileri, kuraklık izleme, tarım ve su kaynakları yönetimi için değerli bilgiler sağlayarak, geniş alanlarda toprak neminin yüksek zamansal ve mekansal çözünürlükte takip edilebilmesi için giderek daha fazla kullanılmaktadır. CYGNSS misyonu neredeyse günlük veri sunması sayesinde uzay tabanlı GNSS-R toprak nemi gözlemi için değerli bir veri kaynağı olmuştur (Clarizia ve Ruf, 2016).

Literatürde CYGNSS-tabanlı toprak nemi verileriyle yapılan çalışmalar genel olarak toprak nemi hesaplanması için algoritma geliştirmeye ve elde edilen toprak nemi verilerinin doğrusal olmayan modelleme algoritmaları ile tahmin modeli geliştirilmesine odaklanmıştır (Chew & Small, 2018; Clarizia ve ark., 2019; Eroglu ve ark., 2019; Senyurek ve ark., 2020). Ancak, uzaktan algılama tekniklerine dayalı toprak nemi verilerinin pratikte doğrudan kullanılabilirliklerinin ortaya konulması için bu veri setlerinin doğruluk ve güvenilirliğinin farklı veri kaynaklarıyla doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda CYGNSS'den üretilen toprak nemi verilerinin öncül doğrulanması Chew ve Small, 2020 tarafından 171 yer istasyonu kullanılarak yapılmış ve CYGNSS'in yersel veri ile korelasyonu $R=0.40$

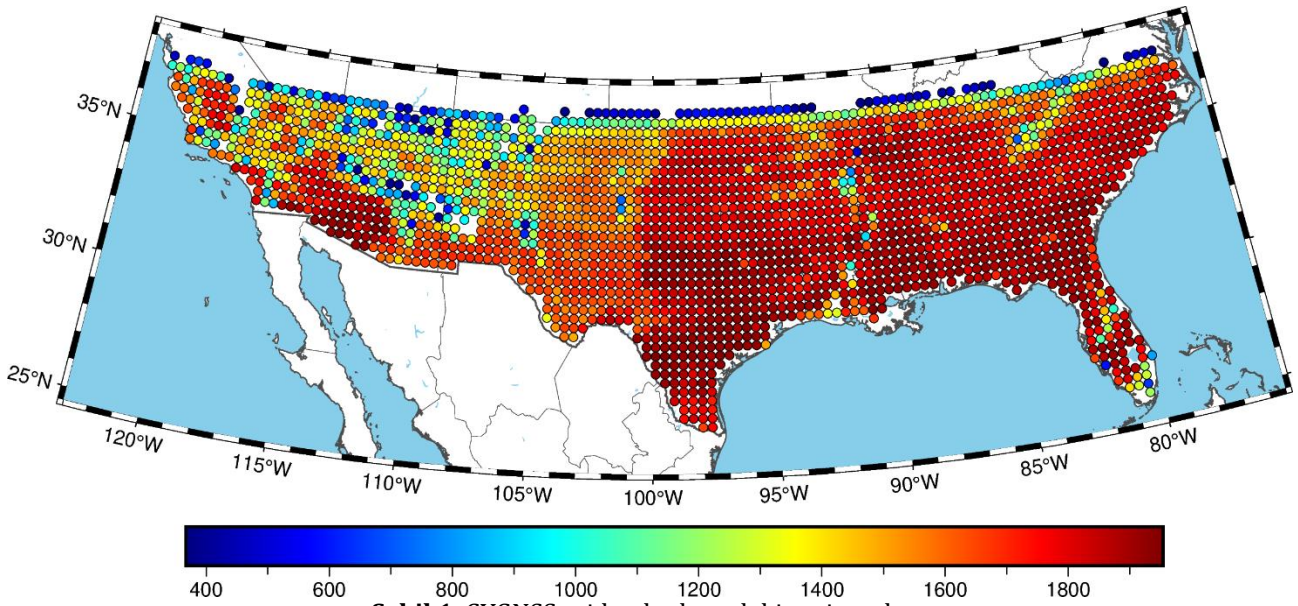
olarak bulunmuştur. Wang ve ark., (2022b) kuazi global olarak CYGNSS toprak nemi verileriyle doğrulama çalışması gerçekleştirmiş olup yersel veri ile korelasyon katsayısının yaklaşık R=0.40 olduğunu tespit etmiştir.

Bu çalışmada öncelikle CYGNSS uydu misyonundan elde edilen verilerin özellikleri hakkında detaylı bilgi vermek daha sonra da bir test bölgesinde bu verilerden türetilen toprak nemi değerlerinin kullanılabilirliğini incelemek amaçlanmıştır. Bu kapsamda, CYGNSS misyonunun coğrafi kısıtları göz önünde bulundurularak Kıtasal Amerika Birleşik Devletleri (CONUS) bölgesindeki Uluslararası Toprak Nemi Ağı'na (International Soil Moisture Network - ISMN) ait istasyonlardaki zaman serileri ile birlikte SMAP uydu misyonuna ait toprak nemi verileri kullanılmıştır. CYGNSS misyonunun çalışma bölgesindeki

istasyonlardaki performansı farklı toprak yapılarında ve iklim koşullarında değerlendirilmiş ve böylece jeofiziksel koşulların değişiminin CYGNSS misyonundan elde edilen toprak nemi verilerine etkisi incelenmiştir.

2. Veri seti ve yöntem

Bu başlık altında çalışmada kullanılan veri setleri ve yöntem alt başlıklar halinde açıklanmıştır. Çalışma alanı CONUS bölgesinde 25°-38° Kuzey enlemleri ve 75°-122° Batı boylamları arasında kalan alandır (Şekil 1). Çalışma bölgesi seçiminde CYGNSS uydu misyonunun ±38 enlemler arasını kapsamaması ve Meksika siyasi sınırının ötesinde ISMN istasyonu bulunmaması gibi kısıtlar dikkate alınmıştır.



Şekil 1. CYGNSS grid noktalarındaki veri sayıları.

2.1. CYGNSS toprak nemi verisi

Cyclone Küresel Navigasyon Uydu Sistemi, bir bistatik radar sistemi olan Global Navigasyon Uydu Sistemi-Reflektometri yaklaşımını benimser. CYGNSS, sinyal kaynağı olarak GNSS uydularından iletilen navigasyon sinyallerini kullanır. CYGNSS, ileri saçılan sinyalleri analiz ederek toprak nemi hakkında doğru bir şekilde bilgi toplayabilir. Bu sinyaller alıcı tarafından gecikmeli Doppler haritası (Delay-Dopler Map (DDM)) biçiminde kaydedilir. Bir DDM oluşturmak için alınan sinyal, çeşitli yol gecikmelerinde ve Doppler kaymalarında yerel olarak oluşturulmuş bir kopya ile çapraz korelasyona tabi tutulur. DDM'ler genellikle her DDM'nin tepe çapraz korelasyonu (peak cross-correlation) veya sinyal gürültü oranı (SNR) gibi bir metrik ile özetlenir. Bu değerler GNSS sinyalinin yansıma noktasındaki pürüzlülük ve yüzey dielektrik sabiti gibi yüzey özellikleriyle ilgilidir. Dolayısıyla toprak nemi kestiriminde kullanılabilir (Chew & Small, 2018).

DDM'lerden elde edilen tepe değerler desibele çevirilerek sinyalin gücü hesaplanır (P_{rl}^t). Sinyalin gücünü etkileyen faktörler arasında toprak nemi ve yüzey pürüzlülüğünün yanında alıcı anten kazancı,

bistatik menzil ve GPS uydusundan iletilen sinyalin gücü de yer alır (Eşitlik 1).

$$P_{rl}^r = \frac{P_r^t G^t}{4\pi(R_{ts} + R_{sr})^2} \frac{G^r \lambda^2}{4\pi} \Gamma_{rl} \quad (1)$$

P_r^t iletilen güç, G^t ve G^r sırasıyla verici ve alıcı anten kazançlarıdır. λ GPS dalga boyunu, R_{ts} verici ve speküler nokta arasındaki mesafeyi, R_{sr} alıcı ile speküler nokta arasındaki mesafeyi belirtmektedir. Γ_{rl} olarak gösterilen gözlemlenebilir yüzey yansıması, DDM'lerin tepe değeri hesaplanarak ve bir kalibrasyon faktörü uygulanarak belirlenir.

CYGNSS Seviye 3 Toprak Nemi ürünü, subtropikal bölgeler için yüzey toprak nemini (0-5 cm derinlik) içermektedir. Bu ürün University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) ve Colorado University (CU) CYGNSS projesi üzerinde çalışan araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur. Toprak nemi verileri 6 saatlik periyotlarla günde en fazla dört toprak nemi değeri içeren $SM_{subdaily}$ ve bunların günlük ortalamasını içeren SM_{daily} değerlerini içermektedir. SMAP uydusundan elde edilen mekansal çözünürlük uyumlu olması için 36 km çözünürlüklü gridler halinde hesaplanan Seviye 3 verileri Mart 2017'den itibaren

günümüze kadar olan dönemi kapsamaktadır (Chew ve Small, 2020b). CYGNSS Seviye 3 Toprak Nemi ürünü servis edilmeden önce kalite kontrol aşamasında standart kalite ölçmeleri ile işaretlenen CYGNSS gözlemleri, toprak neminin $0.01 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ 'ten az veya $0.65 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ 'ten büyük değerler ve açık denizden etkilenen noktalar kaldırılmıştır (Chew ve Small, 2020a).

Çalışma bölgesi için CYGNSS Seviye 3 ürünlerinin orijinal grid noktaları ve ISMN istasyonlarında Mart 2017 ve Aralık 2022 tarihleri arasındaki zamanı kapsayacak şekilde günlük yüzey toprak nemi verileri için zaman serileri oluşturulmuştur. 365 günden daha az veri içeren zaman serileri veri setinden çıkarılmıştır. CYGNSS toprak nemi verilerinin çalışma bölgesi içinde farklı veri yoğunluklarına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 1'de görüldüğü üzere özellikle doğu bölgelerindeki veri sayısı batı bölgelerine göre daha fazladır. Veri sayısının az olduğu alanların kalite kontrol aşamasındaki kriterlere uygun olmayan gözlemleri barındırdığı düşünülmektedir.

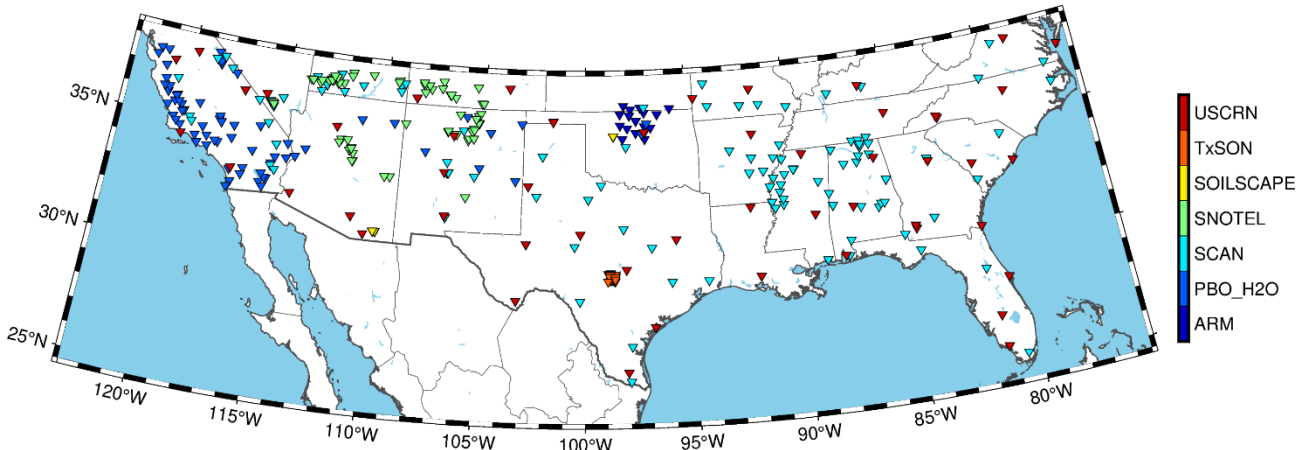
2.2. Doğrulama veri seti

2.2.1. Uluslararası toprak nemi ağı

ISMN çeşitli üniversiteler tarafından sürdürülen ve ESA tarafından desteklen küresel ölçekte farklı coğrafi bölgelerden ve iklimlerden toprak nemi verilerinin toplanmasını ve paylaşılmasını amaçlayan bir projedir. Bu ağa bağlı istasyonlardaki toprak nemi gözlemlerinin zaman serilerinin yanı sıra iklim bilgisi, arazi örtüsü, toprak dokusu özellikleri gibi veriler de sağlanmaktadır. ISMN, toprak nemi değerlerini kontrol etmek amacıyla jeofiziksel ve spektrum tabanlı yöntemler kullanarak her bir gözlem verisinin kalitesini ve buna bağlı olarak

kullanılabilirliğini standartlarla belirlenmiş veri protokolleri ile sağlamaktadır (Dorigo ve ark., 2021; Dorigo ve ark., 2011).

Çalışma kapsamında, sürekli gözlem yapan USCRN (Bell ve ark., 2013), TxSON (Caldwell ve ark., 2019), SOILSCAPE (Moghaddam ve ark., 2011), SNOTEL (Leavesley, 2010), SCAN (Schaefer ve ark., 2007), PBO_H2O (Larson ve ark., 2008) ve ARM (Cook, 2016) adlı ağlara ait meteoroloji istasyonlarından sağlanan veriler kullanılmıştır (Şekil 2). Sıcaklık ve yağış gibi meteorolojik verileri de takip eden bu yer gözlem istasyonları, toprak nemini farklı derinlikleri temsil eden katmanlar için kaydetmektedir. Bu katmanlardan yeryüzüne en yakın olan birinci katman 0-5 cm derinlikteki toprak nemi olup *toprak yüzey nemini* temsil etmektedir. Çalışmada kullanılan CYGNSS ve SMAP uydularından elde edilen toprak nemi verileri ile aynı derinliği temsil ettiği için birinci katmandaki veriler kullanılmıştır. ISMN veri platformundan Mart 2017 ve Aralık 2022 tarihleri arasındaki saatlik toprak yüzey nemi zaman serileri elde edilmiştir. Toprak nemi gözlemleri jeofizik tabanlı ve spektrum bazlı metotlar kullanılarak incelenmektedir. Şüpheli gözlemler "C" ve "D" kodlarıyla işaretlenirken geçerli gözlemler için ise "G" kodu kullanılır. Bu çalışmada ise sadece "G" kodlu veriler dikkate alınmıştır. Ayrıca veri setleri arasındaki uyumu sağlamak amacıyla istasyonlardaki saatlik toprak nemi verilerinin ortalaması alınarak günlük veriye dönüştürülmüştür. Zaman serisi bir yıldan daha kısa olan ve aynı toprak nemi değerini ardışık 30 günden fazla tekrar eden istasyonlar veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlemler sonunda kalan 213 adet ISMN istasyonuna ait zaman serileri çalışma kapsamında doğrulama verisi olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. Çalışma bölgesindeki ISMN istasyonları.

2.2.2. SMAP toprak nemi verisi

SMAP uydusu toprak nemini takip etmek amacıyla 31 Ocak 2015 yılında NASA tarafından başlatılan bir misyondur. Radar L-bandı (aktif) ve radyometre (pasif) olmak üzere iki ana enstrümanı taşıyan SMAP uydusu küresel ölçekte 2-3 gün zamansal çözünürlükte ve 36 km mekânsal çözünürlükte veri sağlamaktadır.

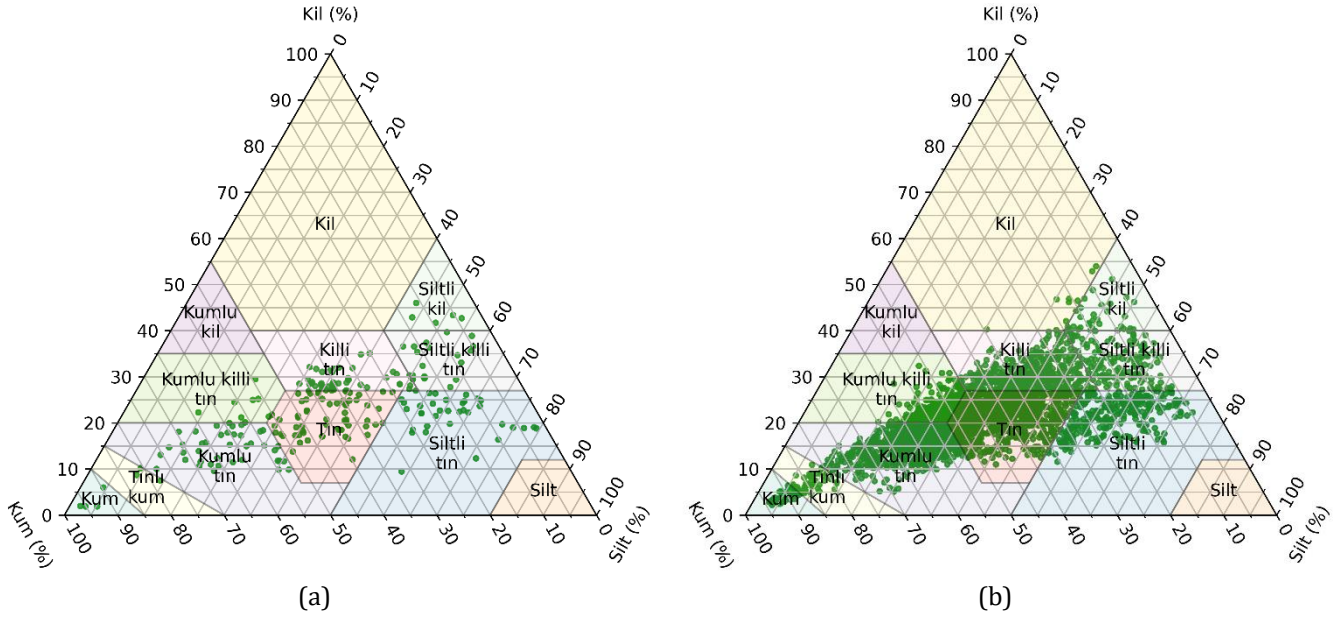
Bu çalışmada, mekânsal çözünürlüğü 9 kilometre ve zamansal çözünürlüğü 3 saat olan SMAP seviye-4 (SMAP-L4) verileri kullanılmıştır. SMAP seviye-4 ürünü SMAP

seviye-1c ürünün sıcaklık parlaklık gözlemleri, NASA arazi yüzeyi modeli, meteorolojik veriler ve çeşitli arazi modelleriyle asimilasyon edilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu çalışmada Google Earth Engine (GEE) platformu kullanılarak oluşturulan SMAP-L4 yüzey toprak nemi zaman serileri 2017-2023 yılları arasında günlük olarak elde edilmiştir. CYGNSS verisi ile uyumlu olacak şekilde SMAP-L4 verileri de 0-5 cm yüzey toprak nemini temsil etmekte olup SMAP-L4 zaman serileri CYGNSS grid noktalarında üretilmiştir.

2.3. Yardımcı veri seti

CYGNSS gözlemleri, toprak nemine ek olarak topografya, arazi örtüsü, su kütleleri ve toprak dokusu dahil olmak üzere bir dizi arazi yüzeyi özelliğinden etkilenebilir. Bu sebeple makale kapsamında toprak dokusu için SoilGrid modeli (Poggio ve ark., 2021) kullanılmıştır. SoilGrid organik karbon, pH, toprak doku fraksiyonları gibi toprak özellikleri için dünya çapında tahminler sunan 250 m mekansal çözünürlüğe sahip bir modeldir. Bu çalışmada her bir CYGNSS grid noktası için silt, kil ve kum oranları SoilGrid modelinden ortalama

alınarak türetilmiştir. Toprak dokusu, nem içeriği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Killi ve siltli topraklar daha fazla su tutma özelliğine sahiptir ve killi topraklar suyu daha uzun süre tutar. Bu nedenle, killi topraklar nem tutma için ideal iken siltli topraklar ise bitki büyümesi için daha uygundur (Celik ve ark., 2022). Şekil 3 çalışma bölgesindeki ISMN'e ait yer istasyonlarındaki ve CYGNSS grid noktalarındaki toprak dokusunun dağılımını göstermektedir. Şekil 3a'ya bakıldığında bu çalışmada kullanılan yer istasyonlarındaki toprak dokusunun dağılımı çalışma bölgesindeki genel dağılımı yansıtmaktadır.



Şekil 3. ISMN yer istasyonlarındaki (a) ve CYGNSS grid noktalarındaki (b) toprak dokusunun dağılımı.

2.4. Doğruluk kriterleri

CYGNSS misyonundan elde edilen toprak nemi değerlerinin yer istasyonları ve SMAP uydusunun zaman serileriyle karşılaştırmasında performans kriteri olarak Pearson korelasyon katsayısı ve yansız karesel ortalama hata (ubRMSE) kullanılmıştır.

Pearson korelasyon katsayısı (Eşitlik 2):

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Yansız karesel ortalama hata (Eşitlik 3):

$$ubRMSE = \sqrt{(RMSE)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)\right)^2} \quad (3)$$

Denklemlerde yer alan y_i ve \bar{y} sırasıyla, doğrulama verisi olarak kullanılan toprak nemi ve ortalamasını ifade etmektedir. CYGNSS'den elde edilen toprak nemi verileri ise x_i ile gösterilmektedir.

3. Bulgular

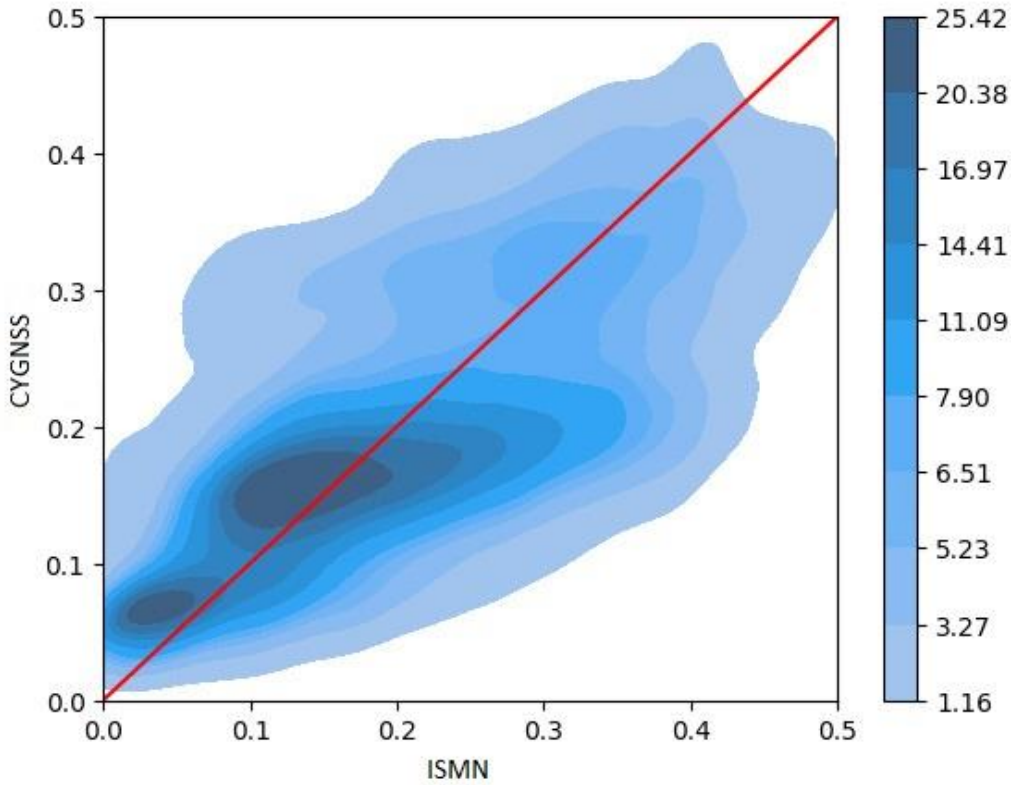
Uzaktan algılama verilerinden elde edilen sonuçların yer gerçeği ile karşılaştırılması önemlidir. Çalışma bölgesinde bulunan yer istasyonları sayesinde, uzay tabanlı GNSS-R ölçmelerinden elde edilen toprak nemi verilerinin performansı doğrulanabilir. Ayrıca CYGNSS nispeten yüksek zamansal çözünürlüğe sahip olduğu için, SMAP verilerine karşı grid tabanlı değerlendirme yapmak amacıyla zaman serileri elde etmek mümkündür. Çalışma bölgesindeki CYGNSS tarafından sağlanan toprak nemi verilerine ait günlük zaman serileri, yer istasyonlarından ve SMAP uydusundan elde edilen günlük zaman serileriyle karşılaştırılmıştır. Kıyaslama ISMN verileriyle sadece noktasal olarak yapılırken SMAP verileriyle grid bazlı yapılmıştır.

3.1. CYGNSS ve ISMN toprak nemi verilerinin karşılaştırması

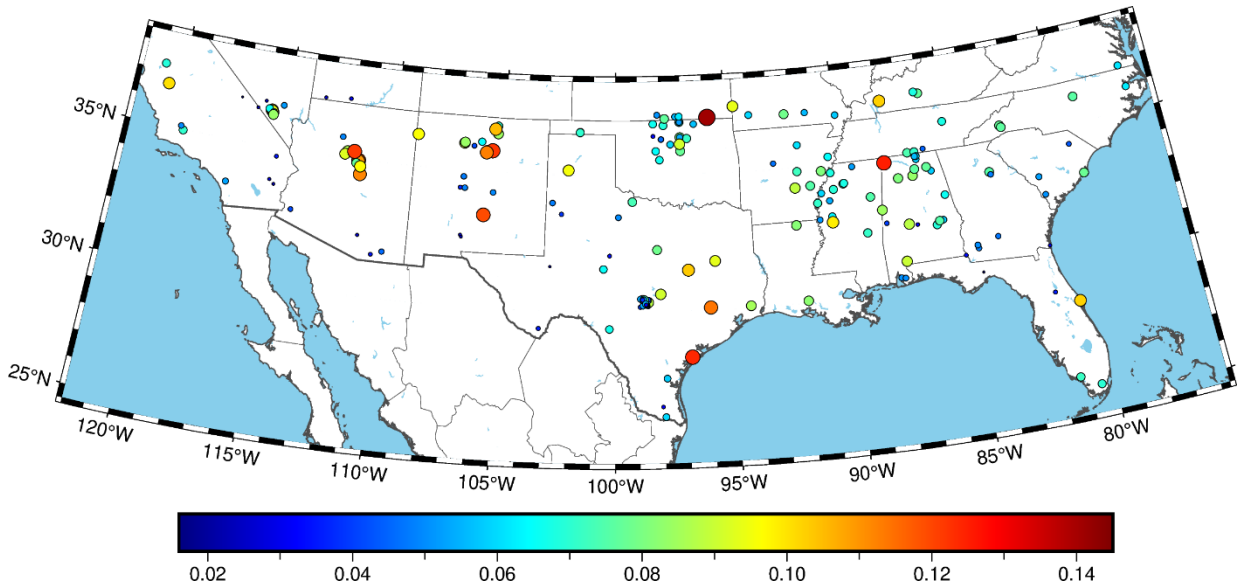
Mart 2017 - Aralık 2022 tarihleri arasında CYGNSS'den elde edilen toprak nemi verileri ile ISMN istasyonlarından elde edilen veriler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İstatistik sonuçlarına göre, Pearson korelasyon katsayısının 0.45 ve ortalama ubRMSE değerinin 0.052 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4'te

verilen CYGNSS ve ISMN toprak nemi verilerinin saçılım yoğunluk grafiğinde nokta yoğunluğunun 1:1 doğrusu etrafında kümelendiği görülmektedir. Şekil 5 yer istasyonlarındaki toprak nemi gözlemleri ile CYGNSS verileri arasındaki ubRMSE değerlerinin dağılımını göstermektedir. CYGNSS toprak nemi verileri açık denizlerden etkilendiği için kıyı bölgelerinde ubRMSE değeri diğer istasyonlara göre yüksektir. Ayrıca CYGNSS'in ayak izinin büyük olması sebebiyle göl ve nehir gibi farklı yüzeylerden sinyaller içerebilmektedir. Bu sebeple sulak alanların da büyüklüğüne bağlı olarak CYGNSS toprak nemi verilerinin güvenilirliğini azaltabilir. CYGNSS'in farklı iklim sınıflarındaki gözlemlerinin toprak nemi belirlemedeki performansını incelemek

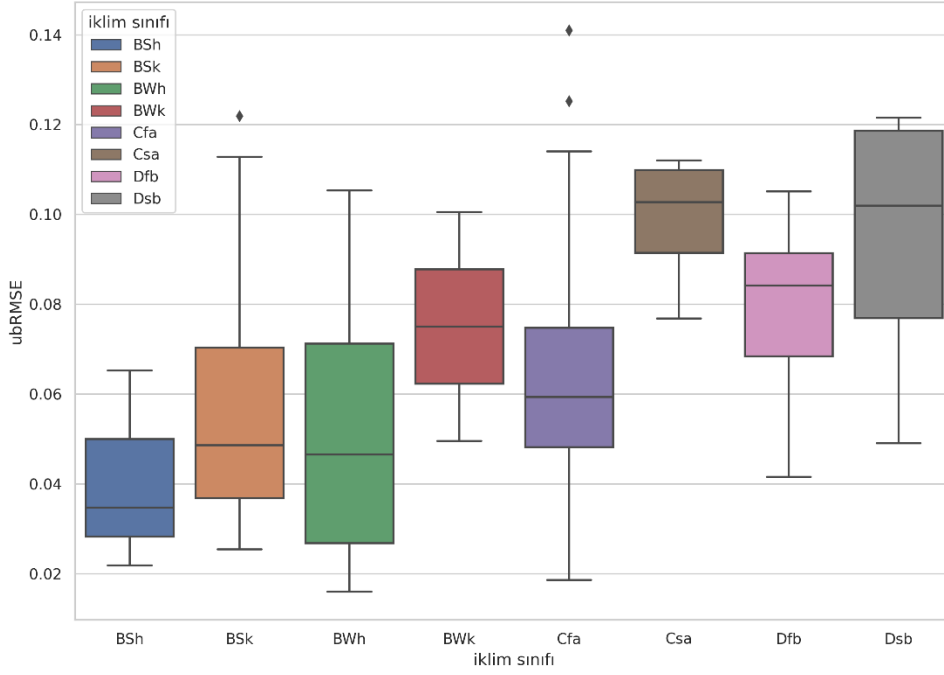
amacıyla ISMN istasyonlarındaki ubRMSE değerleri istasyonların iklim sınıflarına göre kutu grafik olarak verilmiştir (Şekil 6). CYGNSS Kurak (B) iklimde, ılıman (C) ve karasal (D) iklim tiplerine göre daha iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. En küçük ubRMSE değeri ise (≈ 0.035) sıcak yarı kurak iklim (BSH) alt sınıfı için elde edilmiştir. Şekil 7 ISMN istasyonlarına ait toprak dokusunu temsil eden grafiği göstermektedir. Aynı zamanda ISMN ile CYGNSS toprak nemi verileri için ubRMSE ve ortalama mutlak hata değerlerini ifade etmektedir. Şekillere bakıldığında topraktaki kum oranı arttıkça ubRMSE değerinin azaldığı fakat ortalama mutlak hata değerinin arttığı görülmüştür.



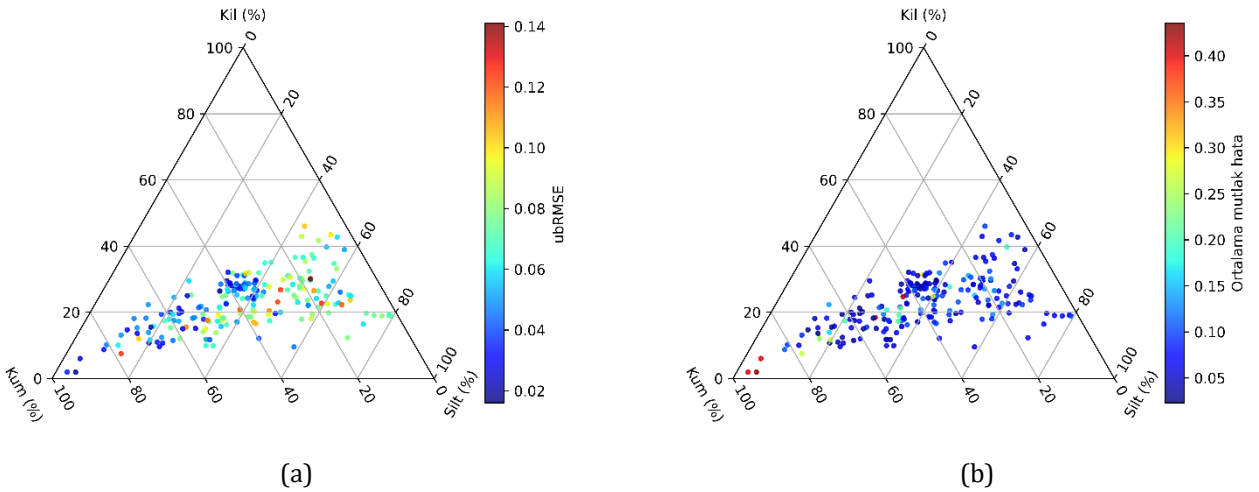
Şekil 4. CYGNSS ve ISMN'den elde edilen toprak nemi verilerinin saçılım grafiği (renk skalası nokta yoğunluğunu göstermektedir.) [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].



Şekil 5. ISMN istasyonlarındaki ubRMSE değerleri [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].



Şekil 6. CYGNSS toprak nemi verilerinin yersel veriyle olan ubRMSE değerleri ile iklim sınıfları (Aw, Cfb ve CSb iklim sınıfları birer adet istasyonu ifade ettiği için şekilde gösterilmemiştir.) [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].



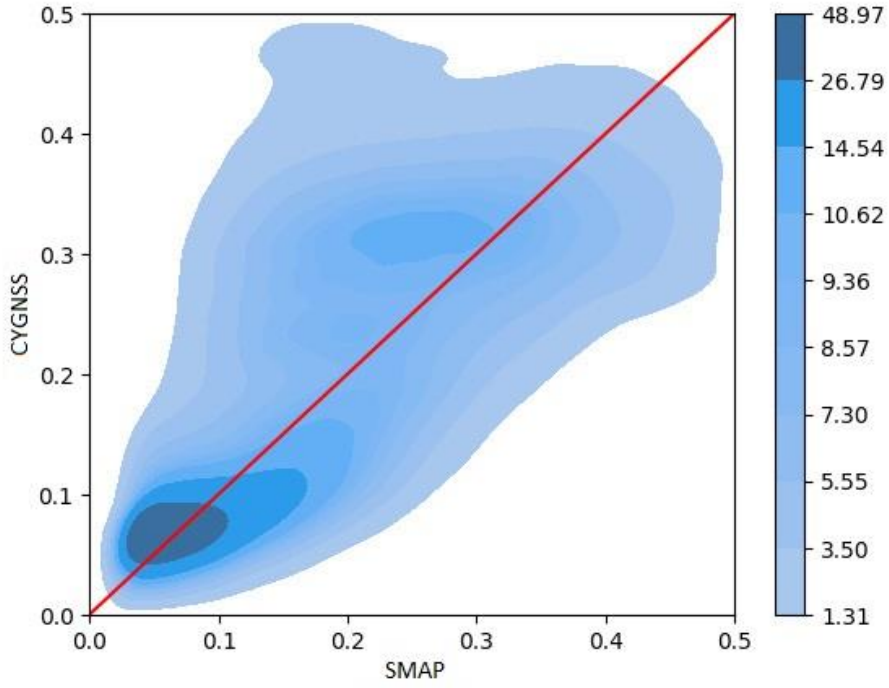
Şekil 7. ISMN istasyonlarındaki ubRMSE (a) ve ortalama mutlak hata (b) değerlerine göre toprak sınıfı dağılımı [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].

3.2. CYGNSS ve SMAP toprak nemi verilerinin karşılaştırması

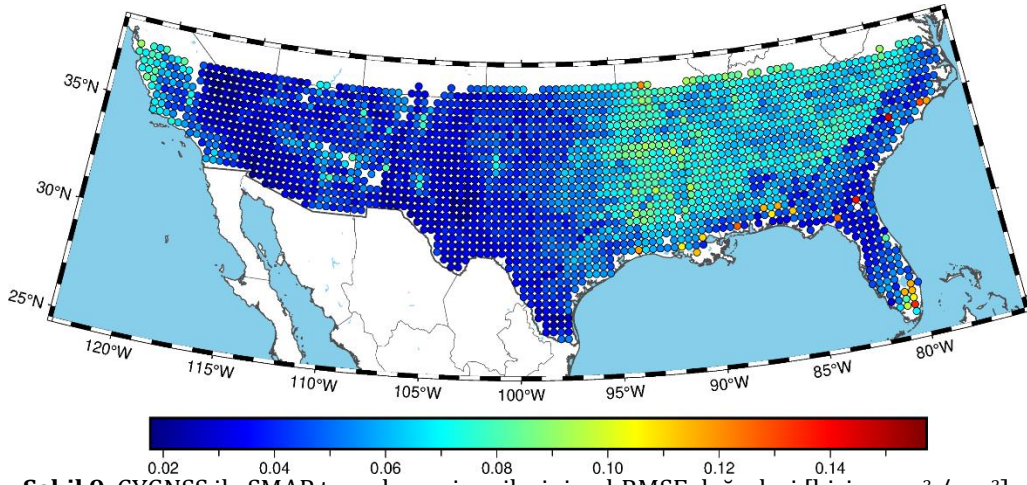
Şekil 8, CYGNSS toprak nemi verileri ile SMAP verileri arasındaki korelasyonu ortaya koymaktadır. Veri noktaları ağırlıklı olarak 1:1 çizgisi etrafında yoğunlaşmıştır. Genel istatistiklerde CYGNSS toprak nemi verilerinin SMAP doğrulama verisiyle ($R = 0.67$) güçlü bir korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, CYGNSS'in toprak nemi izleme konusunda güvenilir bir kaynak olduğunu ve SMAP uydusu verileriyle uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. CYGNSS toprak nemi gözlemleri SMAP verileriyle kalibre edilmektedir. Bu sebeple, iki veri setinin korelasyonunun

yer istasyonlarına göre daha yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

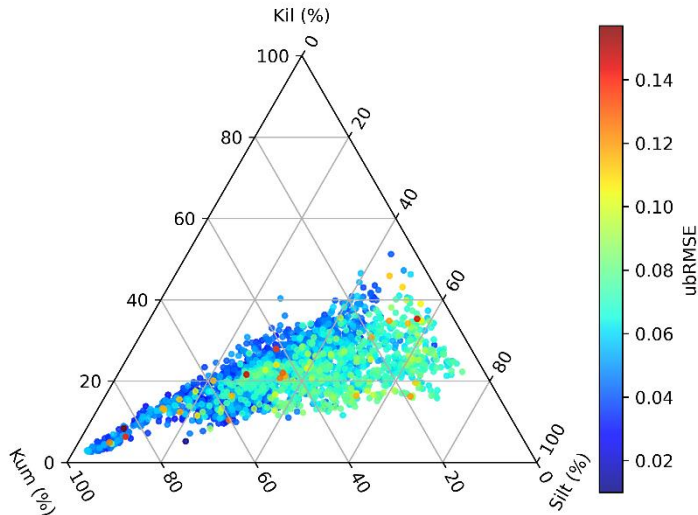
Grid tabanlı istatistiklerin ortalamasına bakıldığında ubRMSE değeri 0.097 olarak hesaplanmıştır. Çok sayıda grid noktası sulak alanlarda veya tarım alanlarında bulunmaktadır. Ayrıca açık denizlere yakın olan noktalarda CYGNSS verileri genellikle toprak nemini doğru bir şekilde yansıtmada başarısız olmaktadır (Şekil 9). CYGNSS'in SMAP verileri ile grid bazlı kıyaslamadaki ubRMSE değerlerini ve toprak dokusunun dağılımı Şekil 10'da yer almaktadır. ISMN istasyonlarındakine benzer şekilde topraktaki kum oranı arttıkça ubRMSE değerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 8. CYGNSS ve SMAP misyonlarından elde edilen toprak nemi verilerinin saçılım grafiği (renk skalası nokta yoğunluğunu göstermektedir.) [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].



Şekil 9. CYGNSS ile SMAP toprak nemi verilerinin ubRMSE değerleri [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].



Şekil 10. CYGNSS grid noktalarında ubRMSE değerine göre toprak sınıfı dağılımı [birim: $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$].

4. Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada CYGNSS misyonundan türetilen toprak nemi verilerinin CONUS bölgesindeki performansı ISMN'ye ait yer istasyonları ve SMAP misyonundan elde edilen toprak nemi verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda CYGNSS'in genel testlerdeki doğruluğu, ISMN verileriyle kıyaslamada pearson korelasyon katsayısı $R = 0.45$, SMAP verileriyle kıyaslamada ise $R = 0.67$ olarak bulunmuştur. CYGNSS toprak nemi verilerinin ISMN ile kıyaslanmasında ubRMSE değeri 0.052, SMAP ile kıyasında ise 0.097 olarak tespit edilmiştir. İstatistikler, CYGNSS'in toprak nemi verilerinin ISMN ve SMAP verileriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Yüksek korelasyon katsayısı değerleri, CYGNSS verilerinin diğer veri kaynaklarından elde edilen toprak nemi değerleriyle benzer eğilimlere sahip olduğunu ve toprak neminin izlenmesinde genel olarak güvenilir bir kaynak olduğunu göstermektedir.

Önceki çalışmalara bakıldığında CYGNSS toprak nemi verilerinin yer istasyonlarında ilk doğrulama çalışması Chew ve Small, 2020a tarafından gerçekleştirilmiştir. Doğrulama verisi olarak CONUS bölgesinde bulunan 171 adet ISMN yer istasyonundan Ekim 2018 ve Aralık 2019 tarihleri arasında elde edilen toprak nemi verileri kullanılmıştır. CYGNSS ve ISMN verileri arasındaki medyan ubRMSE değeri $0.049 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ve $R=0.40$ olarak bulunmuştur. CYGNSS toprak nemi verilerinin doğrulamasını gerçekleştiren diğer bir çalışma ise Wang ve ark., (2022b) tarafından yaklaşık küresel ölçekte yapılmıştır. 2017-2020 yılları arasında Kuzey Amerika, Okyanusya, Asya ve Afrika'daki yer istasyonları ile gerçekleştirilen çalışmada, CONUS Bölgesi'nde 285 istasyon ile yapılan kıyaslamada ubRMSE ve korelasyon katsayısı sırasıyla yaklaşık $0.06 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ ve $R=0.40$ olarak bulunmuştur. Literatürdeki doğrulama çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda, çalışmaların zaman aralıkları ve kullanılan istasyonların sayısı farklılık gösterse de bulgular bölümünde verilen CYGNSS tabanlı toprak nemi verilerinin performansının (Bölüm 3.1) diğer çalışmalarda raporlanan istatistiklerle tutarlı olduğu görülmüştür.

CYGNSS toprak nemi verileri SMAP uydu misyonu ve ISMN istasyonları ile kıyaslanırken iklim sınıfı özellikleri ve toprak dokusu da göz önüne alınarak değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirmeler sonucunda, kum oranının fazla olduğu topraklarda ubRMSE değerinin her iki doğrulama veri setiyle değerlendirildiğinde de düşük olduğu görülmüştür. Kum içeriğinin fazla olduğu topraklarda veya kurak iklim bölgelerindeki toprak neminin düşük değerler alması ubRMSE değerine doğrudan etki etmektedir. Ortalama mutlak hata değerlerinin ise ubRMSE değerlerinin aksine kumlu topraklarda daha yüksek olduğu bulunmuştur. Özellikle toprağın kuru olduğu bölgelerde L-bant mikrodalga sinyalleri toprağın daha derinlerine nüfuz ederek toprak neminin değerinin olduğundan daha büyük algılanmasına neden olmaktadır (Ma ve ark., 2017). Toprak neminin daha yüksek dalgalanma yaşadığı toprak tiplerinde veya yağışlı iklim bölgelerinde daha yüksek hata değerlerinin olması olağan bir durumdur.

UCAR Seviye 3 toprak nemi ürününde kullanılan algoritmayla CYGNSS gözlemleri SMAP toprak nemi değerleriyle lineer bir ilişki kurularak kalibre edilmektedir. SMAP misyonunda toprak nemi değeri doğrudan gözlenen bir değişken olmadığı için bazı varsayımları dolayısıyla belirsizlikleri ve hataları kendi içerisinde barındırmaktadır. Bu sebeple UCAR Seviye 3 ürünü bu hatalardan etkilenmektedir (Chew ve Small, 2020a). Literatürde CYGNSS'in toprak nemi gözlemlerinde kullanılabilirliğine dair çalışmalar olsa da verinin performansının artırılması için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır. CYGNSS gözlemleri ile toprak nemi arasındaki lineer olmayan ilişkinin kurulması, toprak nemi ile toprak dokusu, meteorolojik veriler, topoğrafik veriler gibi analize hazır veriler (Analysis Ready Data – ARD) arasındaki ilişkinin daha detaylı araştırılması, CYGNSS verilerinin mekansal çözünürlüğünün iyileştirilmesi ve kısa, orta ve uzun dönem için toprak nemi tahmini yapabilen bir model oluşturulması gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasında yer almaktadır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan yer istasyonları verileri Uluslararası Toprak Nemi Ağı'ndan (ISMN) temin edilmiş olup verilere erişim https://www.geo.tuwien.ac.at/insitu/data_viewer adresi ile sağlanmıştır. CYGNSS Seviye 3 Toprak Nemi Versiyon 1.0 verileri UCAR/CU tarafından NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC) veri merkezinde ücretsiz olarak servis edilmektedir (<https://podaac.jpl.nasa.gov>).

Araştırmacıların katkı oranı

Muhammed Raşit Çevikalp: Literatür taraması, Analiz, Görselleştirme, **Makale yazımı;** Mustafa Serkan Işık: Fikir, Literatür taraması, Makale yazımı, Düzenleme; **Mehmet Furkan Çelik:** Fikir, Literatür taraması, Makale yazımı, Düzenleme; **Nebiye Musaoglu:** Makale yazımı, Düzenleme

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Adeyemi, O., Grove, I., Peets, S., Domun, Y., & Norton, T. (2018). Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling. *Sensors*, 18(10), 3408. <https://doi.org/10.3390/s18103408>
- Altuntaş, C., & Tunalıoğlu, N. (2022). Deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesinde GNSS-IR yönteminin kullanımı ve doğruluk analizi üzerine bir araştırma. *Geomatik*, 7(3), 187-196. <https://doi.org/10.29128/geomatik.946594>
- Arroyo, A. A., Camps, A., Aguasca, A., Forte, G. F., Moneris, A., Rüdiger, C., ... & Onrubia, R. (2014). Dual-polarization GNSS-R interference pattern technique for soil moisture mapping. *IEEE Journal of Selected*

- Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(5), 1533-1544.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2320792>
- Asgarimehr, M., Wickert, J., & Reich, S. (2019). Evaluating impact of rain attenuation on space-borne GNSS reflectometry wind speeds. *Remote Sensing*, 11(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/rs11091048>
- Bell, J., Palecki, M., Baker, B., Collins, W., Lawrimore, J., Leeper, R., Hall, M., Kochendorfer, J., Meyers, T., Wilson, T., & Diamond, H. (2013). U.S. Climate Reference Network Soil Moisture and Temperature Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 977-988. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0146.1>
- Bünyan Ünel, F., Kuşak, L., Yakar, M., & Doğan, H. (2023). Coğrafi bilgi sistemleri ve analitik hiyerarşi prosesi kullanarak Mersin ilinde otomatik meteoroloji gözlem istasyonu yer seçimi. *Geomatik*, 8(2), 107-123. <https://doi.org/10.29128/geomatik.1136951>
- Caldwell, T. G., Bongiovanni, T., Cosh, M. H., Jackson, T. J., Colliander, A., Abolt, C. J., Casteel, R., Larson, T., Scanlon, B. R., & Young, M. H. (2019). The Texas Soil Observation Network: A Comprehensive Soil Moisture Dataset for Remote Sensing and Land Surface Model Validation. *Vadose Zone Journal*, 18(1), 1-20. <https://doi.org/10.2136/vzj2019.04.0034>
- Cardellach, E., Rius, A., Martin-Neira, M., Fabra, F., Nogues-Correig, O., Ribo, S., Kainulainen, J., Camps, A., & D'Addio, S. (2014). Consolidating the Precision of Interferometric GNSS-R Ocean Altimetry Using Airborne Experimental Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8), 4992-5004. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2286257>
- Celik, M. F., Isik, M. S., Yuzugullu, O., Fajraoui, N., & Erten, E. (2022). Soil Moisture Prediction from Remote Sensing Images Coupled with Climate, Soil Texture and Topography via Deep Learning. *Remote Sensing*, 14(21), 5584. <https://doi.org/10.3390/rs14215584>
- Chew, C. C., & Small, E. E. (2018). Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture. *Geophysical Research Letters*, 45(9), 4049-4057. <https://doi.org/10.1029/2018gl077905>
- Chew, C., & Small, E. (2020a). Description of the UCAR/CU Soil Moisture Product. *Remote Sensing*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/rs12101558>
- Chew, C., & Small, E. (2020b). UCAR-CU CYGNSS Level 3 Soil Moisture Version 1.0. NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/CYGNU-L3SM1>
- Clarizia, M. P., Gommenginger, C., Gleason, S., Galdi, C., & Unwin, M. (2008). Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R) from the UK-DMC Satellite for Remote Sensing of the Ocean Surface. *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1, I-276-I-279. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4778847>
- Clarizia, M. P., Pierdicca, N., Costantini, F., & Floury, N. (2019). Analysis of CYGNSS Data for Soil Moisture Retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7), 2227-2235. <https://doi.org/10.1109/jstars.2019.2895510>
- Clarizia, M. P., & Ruf, C. S. (2016). Wind Speed Retrieval Algorithm for the Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) Mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8), 4419-4432. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2016.2541343>
- Cook, D. R. (2016). Soil Temperature and Moisture Profile (STAMP) System Handbook. <https://doi.org/10.2172/1332724>
- Dorigo, W. A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., & others. (2011). The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675-1698.
- Dorigo, W., Himmelbauer, I., Aberer, D., Schremmer, L., Petrakovic, I., Zappa, L., Preimesberger, W., Xaver, A., Annor, F., Ardö, J., Baldocchi, D., Bitelli, M., Blöschl, G., Bogaen, H., Brocca, L., Calvet, J.-C., Camarero, J. J., Capello, G., Choi, M., ... Sabia, R. (2021). The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(11), 5749-5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., ... Zyl, J. Van. (2010). The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Eroglu, O., Kurum, M., Boyd, D., & Gurbuz, A. C. (2019). High Spatio-Temporal Resolution CYGNSS Soil Moisture Estimates Using Artificial Neural Networks. *Remote Sensing*, 11(19), 2272. <https://doi.org/10.3390/rs11192272>
- Filipović, N., Brdar, S., Mimić, G., Marko, O., & Crnojević, V. (2022). Regional soil moisture prediction system based on Long Short-Term Memory network. *Biosystems Engineering*, 213, 30-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosyseng.2021.11.019>
- Gleason, S. A. M. U. M. (2005). Sensing Ocean, Ice and Land Reflected Signals from Space: Results from the UK-DMC GPS Reflectometry Experiment. *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005)*, 1679-1685.
- Jin, S., & Komjathy, A. (2010). GNSS reflectometry and remote sensing: New objectives and results. *Advances in Space Research*, 46(2), 111-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.014>
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J. P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., Bitar, A. Al, Cabot, F., Gruhier, C., Juglea, S. E., Leroux, D., Mialon, A., & Delwart, S. (2012). The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1384-1403. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2184548>
- Larson, K., Small, E., Gutmann, E., Bilich, A., Braun, J., Zavorotny, V., & Larson, C. (2008). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT*, 35(24).

- <https://doi.org/10.1029/2008GL036013>
Leavesley. (2010). A Modelling Framework for Improved Agricultural Water-Supply Forecasting.
- Li, Q., Zhu, Y., Shangguan, W., Wang, X., Li, L., & Yu, F. (2022). An attention-aware LSTM model for soil moisture and soil temperature prediction. *Geoderma*, 409, 115651.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115651>
- Ma, C., Li, X., Wei, L., & Wang, W. (2017). Multi-Scale Validation of SMAP Soil Moisture Products over Cold and Arid Regions in Northwestern China Using Distributed Ground Observation Data. *Remote Sensing*, 9(4), 327.
<https://doi.org/10.3390/rs9040327>
- Moghaddam, M., Entekhabi, D., Goykhman, Y., Li, K., Liu, M., Mahajan, A., Nayyar, A., Shuman, D., & Teneketzis, D. (2011). A Wireless Soil Moisture Smart Sensor Web Using Physics-Based Optimal Control: Concept and Initial Demonstrations. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3, 522-535.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2010.2052918>
- Orth, R. (2021). Global soil moisture data derived through machine learning trained with in-situ measurements. *Scientific Data*, 8(1), 170.
<https://doi.org/10.1038/s41597-021-00964-1>
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *Soil*, 7(1), 217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Rius, A., Nogués-Correig, O., Ribó, S., Cardellach, E., Oliveras, S., Valencia, E., Park, H., Tarongí, J. M., Camps, A., van der Marel, H., van Bree, R., Altena, B., & Martín-Neira, M. (2012). Altimetry with GNSS-R interferometry: first proof of concept experiment. *GPS Solutions*, 16(2), 231-241.
<https://doi.org/10.1007/s10291-011-0225-9>
- Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Vall-llossera, M., Valencia, E., Marchan-Hernandez, J. F., & Ramos-Perez, I. (2009). Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(11), 3616-3624.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030672>
- Ruf, C., Gleason, S., Jelenak, Z., Katzberg, S., Ridley, A., Rose, R., Scherrer, J., & Zavorotny, V. (2012). The CYGNSS nanosatellite constellation hurricane mission. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 214-216.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351600>
- Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., Fontanelli, G., Clarizia, M. P., Comite, D., Dente, L., Guerriero, L., Pierdicca, N., & Floury, N. (2020). Remote Sensing of Forest Biomass Using GNSS Reflectometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2351-2368.
<https://doi.org/10.1109/jstars.2020.2982993>
- Schaefer, G., Cosh, M., & Jackson, T. (2007). The USDA natural resources conservation service soil climate analysis network (SCAN). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12), 2073-2077.
<https://doi.org/10.1175/2007JTECHA930.1>
- Senyurek, V., Lei, F., Boyd, D., Kurum, M., Gurbuz, A. C., & Moorhead, R. (2020). Machine Learning-Based CYGNSS Soil Moisture Estimates over ISMN sites in CONUS. *Remote Sensing*, 12(7), 1168.
<https://doi.org/10.3390/rs12071168>
- Unwin, M. J., Pierdicca, N., Cardellach, E., Rautiainen, K., Foti, G., Blunt, P., Guerriero, L., Santi, E., & Tossaint, M. (2021). An Introduction to the HydroGNSS GNSS Reflectometry Remote Sensing Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 6987-6999.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3089550>
- Unwin, M., Jales, P., Tye, J., Gommenginger, C., Foti, G., & Rosello, J. (2016). Spaceborne GNSS-Reflectometry on TechDemoSat-1: Early Mission Operations and Exploitation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4525-4539.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2603846>
- Wang, C., Yu, K., Qu, F., Bu, J., Han, S., & Zhang, K. (2022a). Spaceborne GNSS-R Wind Speed Retrieval Using Machine Learning Methods. *Remote Sensing*, 14(14).
<https://doi.org/10.3390/rs14143507>
- Wang, H., Yuan, Q., Zhao, H., & Xu, H. (2022b). In-situ and triple-collocation based assessments of CYGNSS-R soil moisture compared with satellite and merged estimates quasi-globally. *Journal of Hydrology*, 615, 128716.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128716>
- Yang, G., Bai, W., Wang, J., Hu, X., Zhang, P., Sun, Y., Xu, N., Zhai, X., Xiao, X., Xia, J., Huang, F., Yin, C., Du, Q., Wang, X., Cai, Y., Meng, X., Tan, G., Hu, P., & Liu, C. (2022). FY3E GNOS II GNSS Reflectometry: Mission Review and First Results. *Remote Sensing*, 14(4), 988.
<https://doi.org/10.3390/rs14040988>
- Yu, K., Han, S., Bu, J., An, Y., Zhou, Z., Wang, C., Tabibi, S., & Cheong, J. W. (2022). Spaceborne GNSS Reflectometry. *Remote Sensing*, 14(7).
<https://doi.org/10.3390/rs14071605>

