

at  
ik

Haziran 2024  
Cilt: 1, Sayı: 1

June 2024  
Volume 1, Issue 1



# ATMOSFER VE İKLİM DERGİSİ

*JOURNAL OF ATMOSPHERE AND CLIMATE*

atik @ Dergipark



İTÜ



## SU KAYNAKLARININ YÖNETİMİNDE UYDU ÜRÜNLERİNİN ROLÜ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Aynur Şensoy, Gökçen Uysal, Arda Şorman

Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü  
asensoy@eskisehir.edu.tr, gokcenuysal@eskisehir.edu.tr, asorman@eskisehir.edu.tr

### Özet

Uzaktan algılama ve uydu teknolojilerinde meydana gelen önemli ve hızlı ilerlemeler yeni ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımakta ve bu ürünlerin farklı alanlarda kullanımını gündeme getirmektedir. Günümüzde uydu teknolojileri kullanarak hidrolojik döngünün neredeyse tüm elemanlarının doğrudan ve dolaylı ölçümlerini yapabilmektedir. Bu elemanlar arasında, yağış, toprak nemi, kar, su seviyeleri, evapotranspirasyon gibi önemli durum değişkenleri yer almaktadır. Özellikle yer ölçümlerinin çok zor koşullarda ve yüksek maliyetlerle gerçekleştirilebildiği noktalarda, uydu ürünlerinin kullanımı önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu uydu ürünlerinin, su kaynaklarının planlanmasına, geliştirilmesine ve yönetilmesine yardımcı olmak üzere nehir akımlarının modellenmesinde doğrudan ya da dolaylı olarak kullanılması ve model performanslarını iyileştirmesi söz konusudur. Uzaktan algılama teknolojinin bir sonucu olarak elde edilen uydu ürünlerinden bazıları operasyonel olarak gelişme aşamasında olmasına rağmen, geniş kapsama alanları ve yüksek zamansal çözünürlükleri ile neredeyse gerçek zamanlı olarak ve küresel ölçekte veri sağlayabilmektedirler. Bu çalışmada, uydu teknolojisine dayalı yağış, kar ve toprak nemi verilerinin önemine ve gerekliliğine atıfla, su kaynakları alanında kullanılmasına dair uygulama örnekleri sunulmaktadır. Bu uygulamalar arasında, uydu ürünü olarak yağış, kar ve toprak nemi verilerinin, hidrolojik etki ve doğrulama çalışmalarında, kısa-uzun vade akım tahminlerinin modellenmesinde, modelleme yaklaşımlarının doğruluğunun artırılıp belirsizliklerin azaltılmasında (model çoklu kalibrasyonunda, veri asimilasyonunda), taşkın ve kuraklık yönetim planlarında, iklim değişimi projeksiyonlarının ve senaryolarının oluşturulmasında, rezervuar yönetimi alanlarında kullanılması yer almaktadır. Çalışma özellikle yakın zamanda ülkemizde gerçekleştirilen uygulama örneklerini kapsamakta ve değerlendirmeleri içermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Su Kaynakları, Uydu Ürünü, Yağış, Karla Kaplı Alan, Kar Su Eşdeğeri

## THE ROLE OF SATELLITE PRODUCTS IN WATER RESOURCES MANAGEMENT AND APPLICATION EXAMPLES

### Abstract

Significant and rapid advances in remote sensing and satellite technologies enable the development of new products and bring to the agenda the use of these products in different areas. Today, direct and indirect measurements of almost all elements of the hydrological cycle can be made using satellite technologies. These elements include important situation variables such as precipitation, soil moisture, snow, water levels and evapotranspiration. The use of satellite products provides significant advantages, especially at points where ground measurements can be carried out under very difficult conditions and at high costs. These satellite products can be used directly or indirectly in modeling river flows and improving model performances to help plan, develop and manage water resources. Although some of the satellite products obtained as a result of remote sensing technology are in the operational development stage, they can provide data in almost real time and on a global scale with their wide coverage areas and high temporal resolution. In this study, application examples of its use in the field of water resources are presented, referring to the importance and necessity of satellite technology-based rainfall, snow and soil moisture data. Among these applications, satellite product rainfall, snow and soil moisture data are used in hydrological impact and verification studies, modeling of short-long term flow forecasts, increasing the accuracy of modeling approaches and reducing uncertainties (model multiple calibration, data assimilation), flood and drought management plans, it is used in creating climate change projections and scenarios and in reservoir management areas. The study covers application examples and evaluations that have been recently implemented in our country.

**Keywords:** Water Resources, Satellite Product, Precipitation, Snow Cover, Snow Water Equivalent

**Sorumlu Yazar:** Aynur Şensoy

**Geliş Tarihi:** 3 Nisan 2024

**Kabul Tarihi:** 31 Mayıs 2024

**Yayın Tarihi:** 3 Temmuz 2024

**Atıf Şekli:** Şensoy, A., Uysal, G., Şorman, A. (2024). Su Kaynaklarının Yönetiminde Uydu Ürünlerinin Rolü ve Uygulama Örnekleri, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 1-12.

**Makale Tipi:** Derleme

**e-ISSN:** 3023-8560

## GİRİŞ

Suyun mekansal ve zamansal dağılımındaki farklılık suyun kullanımı ve kontrolünü konusunda planlama ve yönetim stratejileri geliştirmeyi gerektirmektedir. Dağılımdaki bu farklılığın yanı sıra artan dünya nüfusu ve gündemimizin önemli bir maddesi olan küresel ısınma ve iklim değişimi sonucu üretilen senaryoların önümüze koyduğu gerçekler, su kaynaklarının planlanmasını ve yönetimini her zamankinden de önemli bir hale getirmiştir. Geniş bir coğrafyaya yayılan ve çeşitli iklim kuşaklarına sahip olan ülkemizde taşkın ve kuraklık gibi uç olayları daha sık ve aynı anda yaşayabilmekteyiz.

Su kaynaklarının etkin ve güvenli yönetimi için havzanın mabadan mansaba kadar ayrılmaz bir bütün olarak gözlenmesi, modellenmesi, akım tahmini yapılması, amaca uygun yönetim stratejileri geliştirilmesi, yönetim planlarının ortaya konulması, takip ve güncelleme çalışmalarının yürütülmesi gerekmektedir. Bu hedefe varabilmek için disiplinler arası ve çok disiplinli çalışmaların gerçekleştirilmesi, özellikle uygulayıcı ve araştırmacıların birlikte çalışması önemlidir.

Hidrolojik modelleme uygulamaları, taşkın ve kuraklık yönetim planlarının oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, su tahsisleri, baraj işletmesi, iklim değişimi etki ve adaptasyon çalışmalarında da kullanılmaktadır. Su kaynakları alanındaki model uygulamalarında diğer alanlarda olduğu gibi girdi değişkenleri, başlangıç ve/veya sınır koşulları ve model parametreleri modele sağlanmaktadır. Uydu ürünleri bu modellerin girdilerini oluşturmak, modelin başlangıç ya da durum değişkenlerini belirlemek, modelin performansını ve/veya güvenilirliği artırmak amacıyla kullanılabilir. Uydu verileri yer gözlemleri ile birlikte kullanılabilir, ayrıca model durum değişkenlerini ya da model çıktılarını iyileştirmek üzere veri asimilasyonu çalışmalarında da kullanılabilirler (Dong, 2018).

Su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde kullanılan uzaktan algılama tabanlı ürünler arasında; yağış, toprak nemi, karla kaplı alan, kar su eşdeğeri, albedo, evapotranspirasyon, yüzey sıcaklığı, bitki örtüsü, arazi kullanımı, ve taşkın alanı sayılabilir. Bilimsel çalışmalarda uydu ürünü olarak özellikle yağış, toprak nemi ve kar ürünlerinin ön plana çıktığı görülmektedir.

Ürünlerin su kaynaklarında kullanımından önce istasyon gözlemlerine dayalı doğruluk analizlerinin yapılması, daha sonra da hidrolojik modeller yoluyla etki değerlendirmesi ve/veya hidrolojik doğrulama çalışmalarının gerçekleştirilmesi söz konusu olmaktadır. Özellikle gözlem ağının yetersiz ya da kısıtlı olduğu havzalarda uydu ürünlerinin kullanımı önemli bir katkı sağlamaktadır. Noktasal temsiliyetin yeterli olmadığı karmaşık topoğrafik ve zor iklim koşullarında, iyi bir mekansal ve zamansal çözünürlüğe sahip uydu ürünlerinin, değerlendirilmesi istenen değişkeni daha iyi temsil edebildiği görülmektedir. Yer ve uydu gözlemleri çoğu zaman birlikte kullanılmakta, model çalışmalarında doğrulama ve veri asimilasyonu yoluyla akım tahminleri gerçekleştirilmekte ve bu da baraj haznelerinin kontrolünü de içeren karar destek sistemlerinin geliştirilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde kullanılmakta olan uydu ürünlerine, bu ürünlerin getirdikleri yeniliklere ve avantajlara, ayrıca bu konuda özellikle ülkemizde yapılmakta olan çalışma ve uygulama örneklerine yer verilmiştir. Ülkemiz genelinde farklı havzalarda kullanım örneklerine yer verilmekle birlikte akım tahmini için yürütülen çalışmaların çoğu birçok ulusal ve uluslararası projede pilot havza olarak kullanılan Yukarı Fırat (Karasu) Havzasında (10.250 km<sup>2</sup>) gerçekleştirilmiştir (URL-1). Seçilen pilot havza Fırat Nehri üzerinde ve akış yukarısında yer almaktadır, kar yağışı ile beslenen bir bölge olması, akış aşağısında önemli barajların yer alması ve sınır aşan sular kategorisinde bulunmasından dolayı önemli bir konuma ve özelliklere sahiptir. Havza üzerinde uzun yıllardır yürütülen ulusal (BAP, DPT, TÜBİTAK, vb) ve uluslararası projeler (EUMETSAT H SAF, Web-2, ve COST ES1404, Web-3) nedeniyle önemli bir deneyim kazanılmış, ülkemizin Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Devlet Su İşleri gibi önemli devlet kurumları ile yürütülen işbirlikleri/protokoller ve çeşitli proje destekleri ile gözlem ağlarının güçlendirilmesi sağlanmış, çok sayıda lisansüstü çalışmanın ve yayınların gerçekleştirilmesi ve bunun yanı sıra bölgede çalıştay ve uluslararası arazi

çalışmalarının yapılması mümkün olmuştur. Çalışmalarda tek bir ürün yerine farklı alansal, zamansal ve tayfsal çözünürlüklere sahip ürünler çoklu olarak kullanılmıştır. Örnekler arasında, uydu yağış, kar ve toprak nemi ürünleri ile yapılan çalışmalar yer almaktadır.

### UYDU YAĞIŞ ÜRÜNLERİ VE KULLANIM ÖRNEKLERİ

Taşkın, kuraklık, depolamalı su yapılarının tasarımı, işletmesi, hidroelektrik enerji üretimi, sulama, iklim değişimi gibi farklı çalışmaların temel bileşeni hiç kuşkusuz yağıştır. Bu nedenle de, su kaynakları alanlarındaki çalışmalarda kullanılan en önemli model girdisi ve meteorolojik değişken yağıştır. Bahsi geçen farklı amaçlara yönelik çalışmalarda yağış-akış ilişkisini kurgulamak için çeşitli kavramsal, fiziksel veya veriye dayalı yaklaşımlar ve modeller geliştirilmiş bulunmaktadır. Yer gözlemleri ile ölçülen bilgilere dayanan alansal ortalama yağış verileri, hidrolojik model performansları üzerinde en büyük etkilerden birine sahiptir (Kidd vd., 2017). Diğer taraftan, alan ve zamandaki yüksek değişkenliği nedeniyle yer gözlemlerine dayalı yağış verisi önemli bir belirsizlik kaynağıdır (Sun vd., 2018). Günümüzde yağışı ölçmek için genellikle üç yöntem kullanılmaktadır, bunlar: meteorolojik istasyon gözlemleri, radar gözlemleri, uydu gözlemleridir (Ashouri vd., 2015, Liu vd., 2017).

Uzaktan algılama prensibine dayalı radar gözlemleri kullanılarak yüksek çözünürlükte ve yakın gerçek zamanlı olarak yağış verisi elde etmek mümkündür. Ancak, radarların sayıca sınırlı olması, yansıtma değerlerinin sayısallaştırılmasındaki zorluklar, topoğrafyanın sinyalleri engellemesi ve radarın taradığı alan ve zamansal kısıtları, radar verilerinin küresel veya geniş ölçekli alanlarda kullanımını sınırlamaktadır (Yılmaz vd., 2017). Öte yandan, mikrodalga temelli yağış algoritmaları geliştirilen mekansal ve zamansal çözünürlükleri de dikkate alındığında gün geçtikçe daha çok uygulama alanı bulduğu da görülmektedir.

Kurulması ve işletilmesi zor olduğu için nispeten sınırlı bir gözlem ağına sahip olan dağlık havzalarda kar erimesine dayalı akışın tahmin edilmesi zorlu bir işittir. Türkiye'nin doğusundaki oldukça yüksek ve karmaşık arazilerde, ölçüm ağının oluşturulması ve sürekliliğinin sağlanılmasının da zorluğu gözetilerek, yüksek alansal ve zamansal çözünürlükte uydu yağış gözlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerek önemli su yapılarının yer alması gerekse kar potansiyelinin yüksek olması nedeniyle bölgedeki gözlemler ve akım tahmin çalışmaları ayrı bir önem arz etmektedir.

Yakın zamanda yapılan çalışmalarda, Hafizi ve Şorman (2023; 2022) ve Uysal ve Şorman (2021) farklı uydu yağış ürünlerinin tutarlılıkları ve hidrolojik uygulamalardaki faydaları değerlendirilmiştir. Hafizi ve Şorman, (2022) 13 tane farklı ve hücresele yağış veri setini (GPDs) (CPCv1, MSWEPv2.8, ERA5, CHIRPSv2.0, CHIRPv2.0, IMERGHFv06, IMERGHHEv06, IMERGHHLv06, TMPA-3B42v7, TMPA-3B42RTv7, PERSIANNCDR, PERSIANN-CCS, and PERSIANN) günlük olarak değerlendirmiş ve 2015-2019 yılları arasında dağlık Karasu Havzasında (38° 58' D - 41°39' D ve 39°23' K - 40°25' K, 10 250 km<sup>2</sup>) kullanmıştır. Bunlardan uydu ürünleri olanlarıyla ilgili özet bir bilgi Tablo 1'de yer almaktadır. Çalışmada yağış-akış ilişkisini modellemek için TUW modeli günlük zaman aralığı ile uygulanmıştır ve havza çıkışında yer alan E21A019 numaralı akım gözlem istasyonunun verileri kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre, Türkiye'nin dağlık doğu kesiminde yer alan Karasu nehir havzasında MSWEPv2.8 ve CHIRP(S)v2.0 ürünleri diğer seçilmiş uydu ürünlerine göre daha iyi performans göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek alansal ve zamansal çözünürlüklü yer bilgisi ile uydu tabanlı yağış ürünlerinde *yanlılık düzeltmesi* önerilmektedir. Genel olarak, günlük toplam yağışı tespit etmede zaman ve alan açısından seçilen ürünlerin çoğu düşük bir performans gösterse de, bazıları günlük ortalama akımları doğru bir şekilde simüle etmektedir. Ayrıca, her veri kümesi için ayrı ayrı model kalibrasyonu yapılarak model parametreleri kalibre edildiğinde uydu ürünlerinin akımı daha iyi simüle ettiği görülmektedir. Yüksek alanlarda daha fazla Meteoroloji Gözlem İstasyonu (MGI) verisi ile daha uzun süreler için doğruluk testleri yapılabilir ancak çalışmadaki bulgular, Türkiye gibi karmaşık topografyaya sahip bölgeler ve dünyanın diğer benzer bölgeleri için mevcut literatüre değerli bir katkı sağlamaktadır.

**Tablo 1.** Kullanılan uydu yağış veri setlerinin özellikleri (Hafizi ve Şorman, 2022)

Veri Seti	Alansal Çözünürlük	Zamansal Çözünürlük	Veri Aralığı
PERSIANN-CCS	0.04°	Saatlik	2003-
CHIRPSv2.0	0.05°	Günlük	1981-
CHIRPv2.0	0.05°	Günlük	1981-
IMERGHFv06	0.10°	30 dk	2014-
IMERGHHEv06	0.10°	30 dk	2014-
IMERGHHLv06	0.10°	30 dk	2014-
MSWEPv2.8	0.10°	3-saatlik	1979-
TMPA-3B42v7	0.25°	3-saatlik	2000-
TMPA-3B42RTv7	0.25°	3-saatlik	1998-
PERSIANN	0.25°	Saatlik	2000-
PERSIANN-CDR	0.25°	Günlük	1983–2016

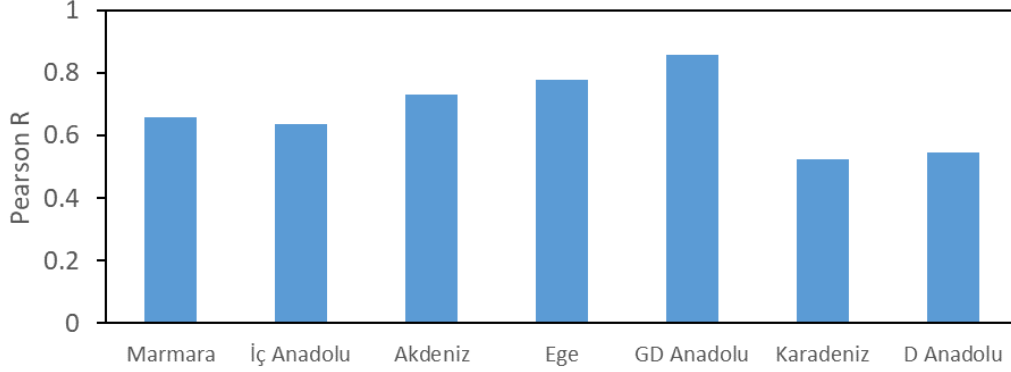
Uysal ve Şorman (2021) yine aynı pilot havzada yaptıkları çalışmada, PERSIANN ve PERSIANN-CDR'nin çeşitli zaman çözünürlüklerinde (mevsimlik ve aylık zaman ölçekleri) performanslarını incelemiştir. Çalışmada PERSIANN-CDR, PERSIANN ile karşılaştırıldığında, MGİ'de ölçülen yağışlarla daha uyumlu olduğu. Her iki ürün için de, karın baskın olduğu bölge üzerinde uygun bir yanlışlık düzeltmesinden sonra günlük akış simülasyonu için yüksek performanslı sonuçlar elde edilmiştir.

Bir başka yakın tarihli çalışmada Hafizi ve Şorman (2023) farklı veri kaynaklarına (çoklu, uydu, yeniden analiz) sahip beş güncel küresel yağış veri setinin (MSWXv100, MERRA-2, CFSR, SM2RAIN-ASCAT, PDIR-Now) performansını, 130 MGİ'den alınan yer verilerinden yararlanarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu çalışmada, tüm Türkiye ve yedi farklı coğrafi bölgedeki iklim değişkenliği beş su yılı (2015–2019) için günlük ve aylık zaman adımlarında dikkate alınmıştır. Bu çalışma, tüm bölge ve yedi coğrafi bölge göz önüne alındığında, çok kaynaklı MSWXv100 ve MERRA-2'nin yanı sıra yeniden analiz edilen CFSR ürünlerinin Türkiye'deki diğer seçilmiş yağış ürünlerine göre daha iyi performans gösterdiğini doğrulamaktadır. Sonuçlar, algoritmalarında yer gözlem verisine yer veren yağış ürünlerinin az farkla da olsa daha iyi performans gösterebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla bilgi kaynağı, düzeltme süresi penceresi ve kullanılan ölçüm cihazı sayısı, nihai ürünün tutarlılığını önemli ölçüde etkileyen faktörler olarak değerlendirilmiştir.

Öte yandan EUMETSAT tarafından desteklenen H SAF projesinde de yağış ürünleri üretilmekte ve kullanıma sunulmaktadır. Bu konuda da Türkiye ve Avrupa için çeşitli doğrulama çalışmaları yürütülmektedir (Puca vd., 2014).

Aşağıdan yukarıya bir algoritma uygulaması ile elde edilen SM2RAIN ürünü farklı bir uydu yağış ürünü için örnek olarak verilebilir. Bu ürün Brocca ve diğ (2014) tarafından önceki yağış miktarlarını çıkarmak için mikrodalga uydu sensörleri tarafından algılanan toprak nemindeki (SM) değişiklikleri kullanan yeni bir "aşağıdan yukarıya" yaklaşım önerilmiş, başka bir deyişle toprak doğal yağmur ölçer olarak kullanılmıştır. SMRAIN-ASCAT yağış ürünü, ASCAT uydusu toprak nemi verilerinin SM2RAIN algoritması ile yağışa çevrilmesi ile elde edilen bir üründür. Bu ürünün Türkiye genelinde doğrulanması ve hidrolojik model uygulaması Jaber (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Coğrafi bölgelere göre yapılan analizlerde elde edilen istatistiksel başarımların yer aldığı bir özet Şekil 1'de sunulmaktadır. Toplam 105 MGİ'de yapılan karşılaştırmada, aylık ilişkilerde  $R=0.6-0.8$  arasında sonuçlar elde edilmiştir. Bu veri aynı zamanda Gediz'deki bir alt havzada hidrolojik model uygulamasında kullanılmış verinin akım simülasyonundaki başarısı değerlendirilmiştir. Gerek doğrudan ürün doğrulanması gerekse modellemeye dayalı hidrolojik doğrulama sonuçları yanlışlık düzeltmesinin gereğine işaret etmektedir.





Şekil 1. SM2RAIN ürününün yer gözlemleri ile kıyası (Jaber, 2020)

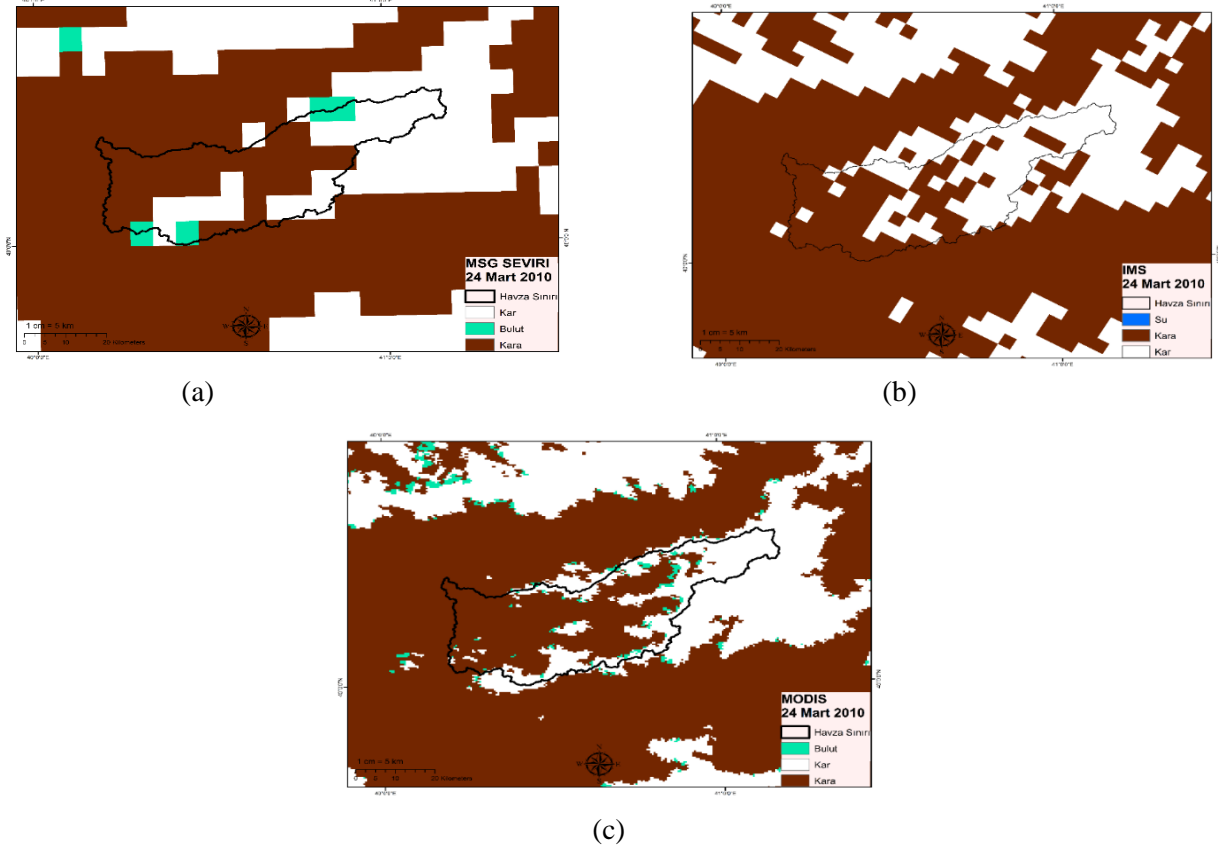
### UYDU KAR ÜRÜNLERİ VE KULLANIM ÖRNEKLERİ

Ülkemizin ortalama yüksekliği 1140 m ve eğimi %20.5'tir ve bu nedenle kar potansiyeli su kaynakları planlama ve yönetimi konularında önemli bir yer tutmaktadır (Açıkyol, 2022). En etkili iki kar değişkeni olan karla kaplı alan ve kar su eşdeğeri, farklı uydu ürünleri ile izlenebilmektedir. Her ikisinin de alansal ve zamansal değişiminin takip edilmesi ve hidrolojik uygulamalarda farklı şekillerde kullanılarak kar erimesine bağlı akımların tahmin edilmesi önemli bir konudur.

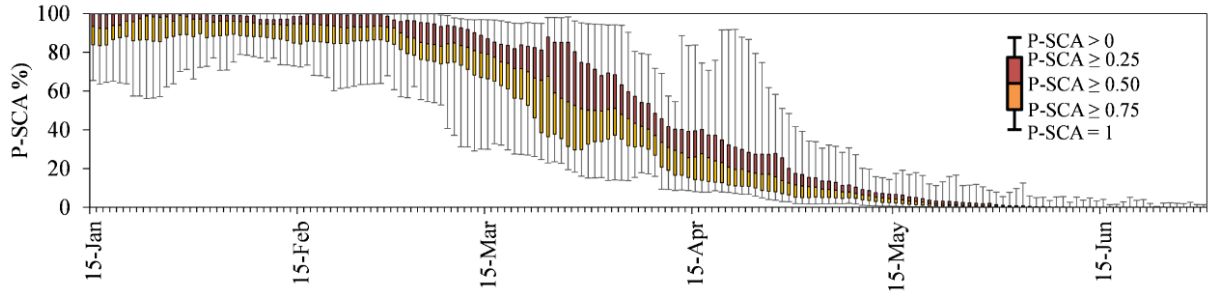
Karla kaplı alan genellikle optik uydu ürünleri ile tespit edilebilmektedir. Farklı alansal, zamansal ve tayfsal çözünürlüklere sahip uydu ürünleri bulunmaktadır, bu özellikler kullanılan alana ve çalışmanın amacına bağlı olarak avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Doğan (2018) tarafından Çoruh Havzası'nın bir alt havzası olan Bayburt Havzası'nda yapılan bir çalışmada 24 Mart 2010 tarihi için karla kaplı alanı tespit etmek için farklı ürünlere örnekler sunulmuştur (Şekil 2). H SAF ürünlerinden birisi olan ve kar tanımlama ürünü olarak geliştirilen SEVIRI (H10)'nin çalışma bölgesindeki çözünürlüğü (5 km), birleştirilmiş bir uydu ürünü olan IMS 4 km ve MODIS 500 m çözünürlüğe sahiptir. En iyi çözünürlüğe sahip olan MODIS uydu görüntüsü bulutluluk nedeniyle dezavantajlı iken, IMS ve kısmen SEVIRI bu konuda avantajlıdır. Büyük alana sahip havzalarda düşük mekansal çözünürlük bir dezavantaj olmazken daha küçük alanlara sahip havzalarda iyi bir çözünürlük önem kazanmaktadır. Öte yandan bu uydu ürünlerinin yer gözlemleri ile doğrulanarak güvenilirliklerinin ve hata oranlarının belirlenmesi de önemlidir.

Karla kaplı alan ürünleri kullanılarak bir havza ya da bölge (ülke) genelinde kar birikme ve çekilme eğrileri elde edilebilmektedir. Maksimum, minimum ve ortalama olarak çıkartılabilen bu eğriler havzanın kar örtüsünün değişimine dair önemli karakteristik bilgiler sunmaktadır. Karla kaplı alan haritaları kullanılarak elde edilen olasılık haritaları gerek olası kar potansiyeli ile ilgili bilgi vermekte gerekse hidrolojik uygulamalarda bir öngörü sunabilmektedir (Şekil 3). Şekilde Karasu Havzasında farklı persentil değerlerine göre karla kaplı alanın çekilme eğrileri sunulmuştur, karla kaplı alanın maksimum değerlere ulaştığı şubat ayında önemli bir saçılma görülmezken erime döneminde özellikle 15 Mart-01 Mayıs aralığında uç değerlerdeki geniş saçılmalar dikkat çekmektedir. Kar çekilme eğrileri, ayrıca, kar kenar çizgisinin elde edilmesi konusunda da belirleyici olmaktadır.

Hidrolojik uygulamalarda kullanılmak üzere Avrupa uydularından yeni ürünlerin elde edilmesi amacını taşıyan EUMETSAT destekli H SAF (URL-2) projesinde farklı kar ürünleri üretilmektedir. Düz/ormanlık ve dağlık alanlar gözetilerek üretilen ve sonunda birleştirilerek sunulan bu ürünlerden en çok kullanılan iki tanesi kar belirleme (SE-E-SEVIRI(H10)) (Şekil 4a, b) ve kar su eşdeğeri (SWE-E-(H13)) ürünleridir (Şekil 4c, d). Projeden üretilen karla kaplı alan ürünleri farklı modellerde kullanılarak hem etki çalışmaları hem de hidrolojik doğrulama analizlerinde kullanılmaktadır (Şensoy vd., 2023).

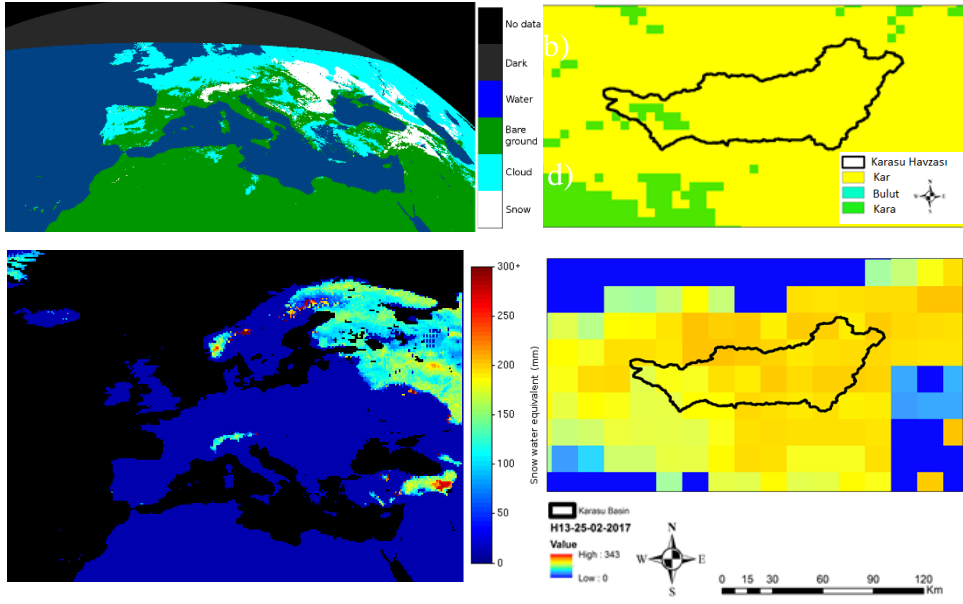


Şekil 2. Karla kaplı alan a) SEVIRI b) IMS c) MODIS (Doğan, 2018)



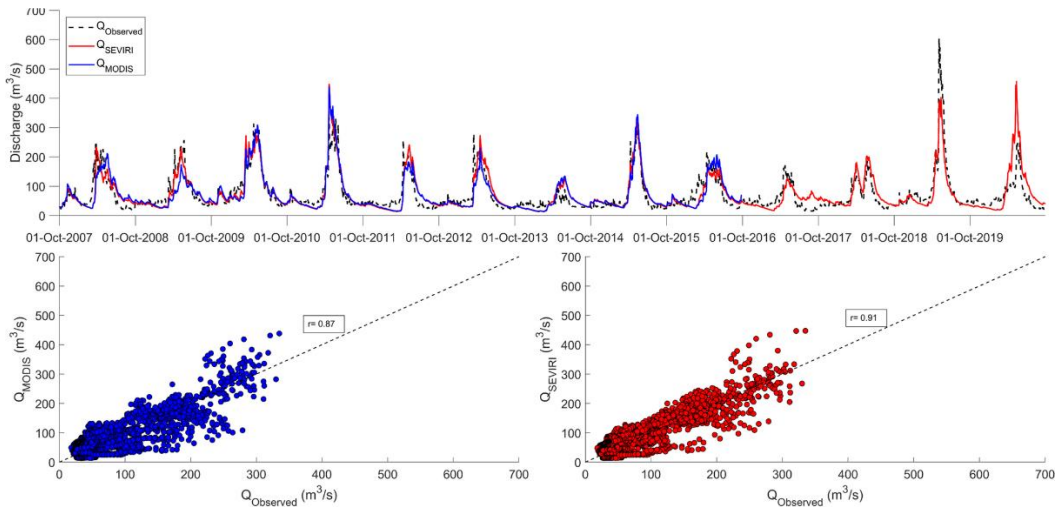
Şekil 3. MODIS'ten üretilen olasılıklı kar çekilme eğrisi (Şorman ve diğ., 2019)

Kar su eşdeğeri ürünleri karla kaplı alandan farklı olarak karın su içeriğine dair bilgi sağlamaktadır. Bu nedenle hidrolojik çalışmalarda önemli bir yeri bulunmaktadır. Uzaktan algılamadaki kar su eşdeğeri ölçümleri mikrodalga sensörlerle yapılmaktadır. Algoritma, karda farklı penetrasyona sahip frekanslardaki kanalların mikrodalga parlaklık sıcaklıklarının kullanımına dayanır. Karın kuru veya ıslak olmasına bağlı olarak penetrasyon değişir. H SAF projesinde de elde edilen kar su eşdeğeri ürünlerinde düz/ormanlık alanlar ve dağlık bölgeler için yöntem ve performans farklı olabilmektedir. Dağlık bölgeler için geliştirilen algoritmada kar yoğunluğunun ve kar özelliklerinin tane boyutuna göre yükseklik ve zaman ölçeğine göre değişimi dikkate alınmaktadır. Alonso-González vd., (2022) yaptıkları çalışmada H SAF kar su eşdeğeri ürününün (H13) yeniden analiz verileri ile karşılaştırmasını sunmuşlardır.



**Şekil 4.** H SAF Kar ürünleri a) SE-E-SEVIRI(H10) ve b) Karasu karla kaplı alan haritası c) SWE-E-H13 ve d) Karasu SWE haritası (25 Şubat 2017)

Hidrolojik model uygulamalarında SRM (Martinec, 1975), HBV (Bergström, 1976) ve HEC-HMS (USACE, 2018) gibi kavramsal modeller tercih edilmektedir. Kavramsal modellerde genellikle derece gün metodu ile kar erimesi hesaplanmakta, ayrıca sıcaklık ve yağış değişimlerini daha iyi temsil edebilmek için havza yükseklik aralıklarına bölünerek çalışılmaktadır. SRM modeli diğer kavramsal modellerden farklı olarak karla kaplı alanı ana girdilerden biri olarak almaktadır ve günlük ortalama debilerin simülasyonunda ve tahmininde kullanılmaktadır. Şekil 5'de SRM (Martinec, 2008) modeli ile yapılan etki çalışması sonuçları sunulmaktadır (Şensoy vd., 2023a). Bu şekilde, en kurak yıllardan biri olan 2014 su yılındaki düşük akımlar ve özellikle 2015 su yılındaki tahminde edilen yüksek tutarlılık dikkat çekmektedir. Bu çalışmada H SAF ürünü SEVIRI ile MODIS ürünleri karşılaştırılmaktadır ve SEVIRI'nin kullanım avantajları ortaya konulmaktadır.

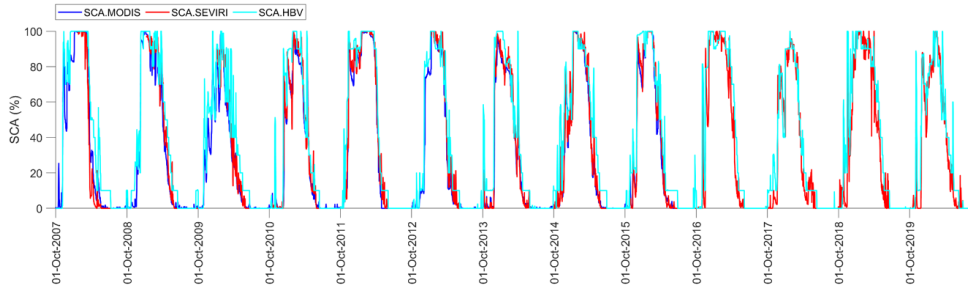


**Şekil 5.** SRM modeli ile etki çalışmaları, SE-E-SEVIRI(H10) ve MODIS (2008-2020) (Şensoy vd., 2023)

Kar erimesi konusunda dünyada en yaygın kullanılan modellerden bir tanesi de HBV'dir. Modelin temel girdi değişkenleri günlük toplam yağış, ortalama sıcaklık ve evapotranspirasyondur. Bu model uygulaması ile hem model çıktısı olarak akımlar hem de durum değişkeni olarak kar su eşdeğeri (ve ona bağlı olarak karla kaplı



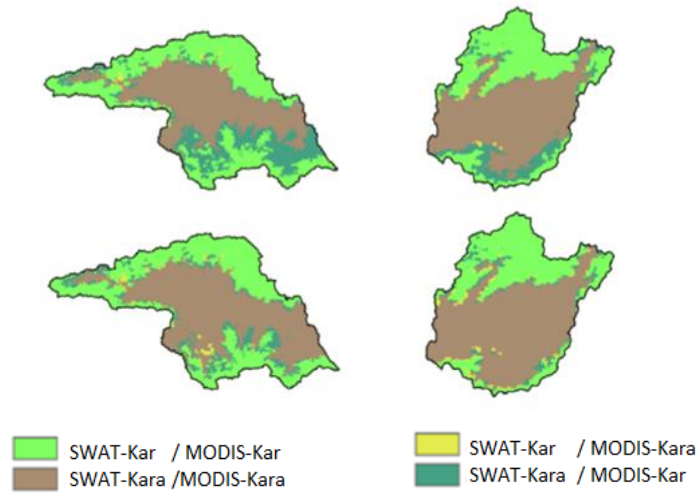
alan) ve toprak nemi simüle edilebilmektedir. Bu model değişkenlerinin de bağımsız ölçümler olarak uydu tabanlı karla kaplı alan ve/veya toprak nemi ürünleri ile karşılaştırılması modelin iç tutarlılığını ve buna bağlı olarak da güvenilirliğini arttırmaktadır. Şekil 6'da 2008-2020 su yılları için model uygulama sonuçları uydu ürünleri ile elde edilen karla kaplı alan değerleriyle kıyaslanmış halde görülebilir.



**Şekil 6.** HBV modeli ile doğrulama çalışmaları, karla kaplı alan (SCA) için model, SE-E-SEVIRI(H10) ve MODIS karşılaştırması (2008-2020) (Şensoy vd., 2023)

Şensoy ve diğ (2023b) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise yine modellerin (HBV ve HEC-HMS) içsel doğruluğu kar ürünleri ile test edilerek iklim projeksiyon verileri (CNRM, EC-EARTH, HadGEM2, IPSL, MPI, NorESM Küresel Çevrim Modelleri ve RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları) 2100 yılına kadar olan dönem için kullanılarak akım ve kar projeksiyonları gerçekleştirilerek değerlendirmeler yapılmıştır. Bölgedeki karla kaplı alan ve kar su eşdeğerinin özellikle havzaların mansap bölgelerinde önemli miktarda azalacağına dair çıkarımlar yapılmıştır.

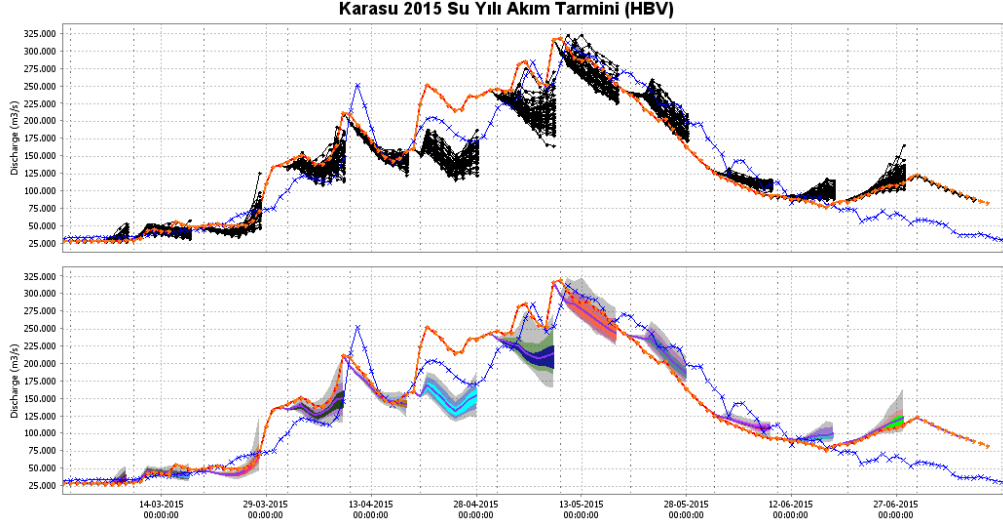
Çeşitli hidrolojik model uygulamalarında model girdi veya çıktısı olarak karla kaplı alan ürünleri kullanılmıştır. Bunlara bir örnek olarak Peker ve Şorman (2021) tarafından yapılan çalışma sunulabilir. SWAT modeli ile yapılan dağılımlı model uygulamasında, akım tahminleri gerçekleştirilmiş ve gözlenen akımlarla kıyaslanmıştır. Bir başka model çıktısı olan karla kaplı alanlar gözlenen uydu görüntüleri (MODIS) ile kıyaslanmıştır (Şekil 7).



**Şekil 7.** SWAT ve MODIS karşılaştırması (8 Nisan 2004) Yukarı Murat (solda) ve Yukarı Karasu (sağda) Havzaları (Peker ve Şorman, 2021)

Modelleme çalışmalarında sayısal hava tahmin verileri kullanılarak akım tahminleri de yapılmaktadır. Ensemble Sayısal Hava Tahminlerine (EPS) dayalı çalışmalara bir örnek Şekil 8'de sunulmuştur. Deterministik tahminlere göre en büyük avantajları daha uzun ve belirsizliğin görülebildiği olasılıklı sonuçlar sağlayabilme fırsatı sunan ECMWF tarafından sunulan IFS Sayısal Hava Tahmin Modeli'nin 51 üyeli EPS yağış ve sıcaklık verileri ile

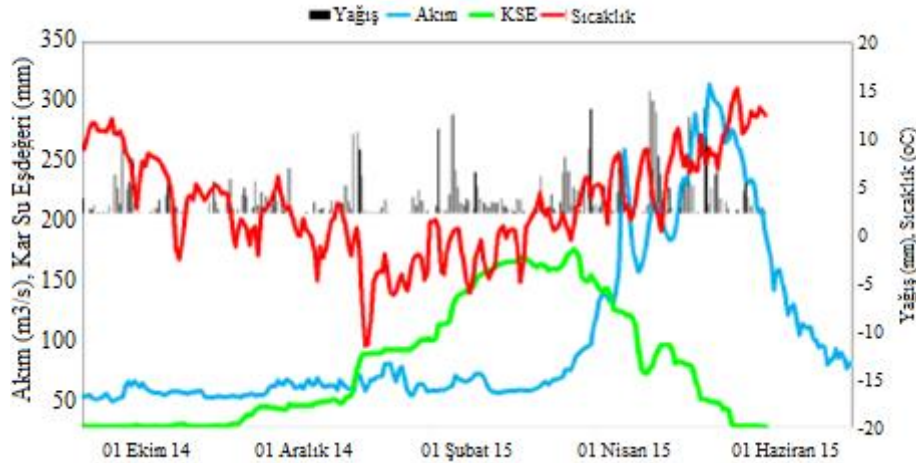
akımlar 1-9 gün aralığında eşit olasılığa sahip 51 ihtimalle üretilebilmektedir. Bu ve benzeri çalışmalarda model parametrelerinin belirlenmesinde uydu verilerinin kullanıldığı, çok kriterli model kalibrasyonları (Oğulcan vd., 2023) ya da kısa vadeli tahminleri iyileştirmek üzere çeşitli veri asimilasyonu (Alvarado-Montero vd., 2022) yaklaşımları kullanılabilir.



Şekil 8. Karasu Havzası EPS uygulaması (Mavi: Gözlenen, Kırmızı: Modellenen), 2015

MODIS karla kaplı alan ürünleri farklı model yaklaşımları kullanılarak akımların tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Bu model yaklaşımlarından bir tanesi de veri güdümlü çalışan Yapay Sinir Ağı model yaklaşımıdır. Model yapısı kurgulanırken karla kapalı alan verisi yağış ve sıcaklık gibi temel girdi değişkenlerinden birisi olarak sunulmuştur. Bu girdinin günlük ortalama akım tahminlerini iyileştirdiği gösterilmiştir (Uysal vd., 2016).

Modelleme çalışmalarında, sonuçların doğrudan kar su eşdeğeri olarak alındığı ve akımların hesaplanmadığı kar modelleri de kullanılabilir. Bu çalışmalarda da derece gün yaklaşımı, kütle ve enerji dengesi metodu ya da hibrit olarak ikisi birlikte kullanılabilir. Bu model yaklaşımları bir noktada ya da dağılımlı olarak tüm havzada sonuç üretebilmektedir. Şekil 9'da SNOW17 modeli ile yapılan bir uygulamada elde edilen kar su eşdeğeri sıcaklık, yağış ve akım ilişkisi içinde sunulmuştur (Ertaş, 2020).



Şekil 9. SNOW17 model, kar su eşdeğeri sonucu (Ertaş 2020)

## SONUÇLAR

Su kaynaklarının planlanması ve yönetiminde yer gözlemlerine dayalı veriler çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Ancak gelişen teknoloji ile bu çalışmalarda kullanılan değişkenlerin önemli bir kısmı uydu ürünleri ile de elde edilebilmektedir. Yeryüzünde noktasal olarak ölçüm yapan MGİ'lerden alınan yer gözlemlerine kıyasla, uzaktan algılama ürünlerinin, söz konusu değişkenin alansal ve zamansal dağılımını ve yine mekansal ve zamansal değişikliklerini tespit etmek konusunda avantajlar sağladığı görülmektedir. Bu durum yer gözlemlerinin değerini azaltmamaktadır, özellikle uydu ürünlerinin ilk kullanımında doğrulama amaçlı olarak yer gözlemlerinden yararlanılmaktadır. Yer gözlemlerinin nitelik, nicelik ve temsiliyet olarak kısıtlı sağlanabildiği karmaşık topoğrafyalarda uydu ürünlerinin kullanımı uygulamalarda önemli katkılar sağlamaktadır. Çok çeşitli hidrolojik uygulamada gerek duyulan temel değişken olan yağışın radarlar ve uydularla yakın gerçek zamanlı tespit edilmesi mümkündür. Bunların yanı sıra, bu ürünlerin de kullanımı ile elde edilen yeniden analiz ürünleri de çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı kuruluşlar ve araştırma ekipleri tarafından üretilen uydu yağış ürünlerinin yer gözlemleri ile kıyası ve modellerde kullanımı üzerine örnekler sunulmuştur. Son dönemde doğrudan uydu yağış ürünlerinin yanı sıra uydu toprak neminden üretilen yağış ürünleri de uygulama alanı bulmaktadır (Koochi vd., 2021, Pradhan ve Indu, 2021, Lai vd., 2022).

Ülkemizin ortalama yüksekliği, topoğrafyası ve özellikle Doğu Anadolu Bölgesinin dağlık kesimleri ülkemiz için kar potansiyelinin önemine işaret etmektedir. İklim ve topoğrafik şartlar nedeniyle yer gözlem ağının kurulmasının ve işletilmesinin zor olduğu bu bölgelerde uydu ürünlerinden elde edilen karla kaplı alan ve kar su eşdeğeri verileri modellerde farklı şekillerde kullanılabilir. Ülkemizin de içinde yer aldığı ve MGM koordinasyonunda çeşitli üniversitelerin (ODTÜ, ESTÜ, İTÜ) katkıları ile yürütülen EUMETSAT H SAF projesinde kar ürünleri üretilmekte ve doğrulama çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmada, karla kaplı alan ve kar su eşdeğeri konularında etki ve doğrulama çalışmalarına örnekler sunulmuştur. Ayrıca, bu ürünler modellerin içsel doğruluğunu tespit etmek için de kullanılabilir. HBV modelinin kullanıldığı bir çalışmanın sonuçları buna örnek olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada yer verilemese de diğer örneklerde bu uydu verileri çoklu model kalibrasyonu yapmak üzere kullanılabilir. Model güvenilirliğini artırmak ve belirsizlikleri azaltmak için bu uygulama çeşitli avantajlar sunabilmektedir. Diğer taraftan, veri asimilasyonu ile tahminlerin iyileştirilmesi aşamasında da bu ürünlerden yararlanılabilmektedir.

Kısaca, su kaynaklarının planlanması ve yönetimi konularında uygulamaya alınan hidrolojik model yaklaşımlarında yer verilerinin yanı sıra uydu ürünlerine dayalı verilerin de kullanılması kaçınılmaz olmuştur. Aynı değişken için farklı mekansal, zamansal ve tayfsal çözünürlüklere sahip uydu ürünleri bulunmaktadır, bu ürünlerin farklı avantaj ve dezavantajları olmaktadır. Ürün doğrulamalarının yapılmasının ardından bu veriler modelleme yoluyla etki ve doğrulama çalışmalarında kullanılabilir. Son olarak, yeni geliştirilen uzaktan algılama ürünlerinin hidrolojik modelleme çalışmalarında sınanması, algoritma geliştiricilere fikir vermesi bakımından kıymetlidir. Özellikle hazne işletmesini, taşkın risk analizlerini, iklim değişimi etkilerini de kapsayan karar destek sistemlerinin geliştirilmesi, yönetim stratejilerinin belirlenmesi ve operasyonel hidrolojik uygulamalarda farklı değişkenleri izlemek için kullanılan çeşitli uydu ürünlerinin kullanılması gerekli ve önemli bir hale gelmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, çeşitli proje destekleri ile yürütülmüş ve ekip çalışmaları ile gerçekleştirilmiş bir birikimi ortaya koymaktadır. Bu çalışmaların başlatılmasını ve sürdürülmesini mümkün kılan değerli hocamız Prof. Dr. A. Ünal Şorman'a ve çalışmalarda emeği geçen tüm öğrencilerimize teşekkürlerimizi ve saygılarımızı sunuyoruz. Çalışmalar EUMETSAT H SAF, COST 1404, TUBITAK ve BAP (ODTÜ, Anadolu Üniversitesi ve Eskişehir Teknik Üniversitesi) projeleri destekleri ile yürütülmüştür. Bu projelerde işbirliği ile çalıştığımız ve destek aldığımız kurumlarımız MGM ve DSİ'ye ve katkı sağlayan değerli personeline teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Açıkyol, S. (2022). Uydu kar görüntülerinin doğrulanması, hidrolojik modelde uygulanması ve iklim değişikliği etkilerinin incelenmesi, Y.Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
- Alvarado-Montero, R., Uysal, G., Collados-Lara, A. J., Şorman, A. A., Pulido-Velazquez, D. ve Şensoy, A. (2022). Comparison of sequential and variational assimilation methods to improve hydrological predictions in snow dominated mountainous catchments. *Journal of Hydrology*, 612, 127981. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127981>.
- Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., . . . Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69-83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>.
- Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI, Reports RHO, No. 7, Norrköping.
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., ... ve Levizzani, V. (2014). Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9), 5128-5141. <https://doi.org/10.1002/2014JD021489>.
- Doğan, Y.O. (2018) Çoruh Havzası'nda çok kriterli hidrolojik modelleme ve tahmin çalışması / Multi criteria hydrological modeling and forecasting study in Coruh basin, Y.Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
- Doğan, Y. O., Şorman, A. A. ve Şensoy, A. (2023). Multi-criteria evaluation for parameter uncertainty assessment and ensemble runoff forecasting in a snow-dominated basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 71(3), 231-247. <https://doi.org/10.2478/johh-2023-0003>.
- González, E. A., Moreno, J. I., Ertaş, M. C., Şensoy, A. ve Şorman, A. A. (2023). A performance assessment of gridded snow products in the Upper Euphrates. *Cuadernos de Investigación Geográfica: Geographical Research Letters*, 49(1), 55-68. <https://doi.org/10.18172/cig.5275>.
- Dong, C. (2018). Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. *Journal of Hydrology*, 561, 573-583. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.027>.
- Ertaş, M.C. (2018) Yukarı Fırat Havzası'nda kar bileşenlerinin ölçülmesi, doğrulanması ve modellenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
- Hafizi, H., ve Şorman, A. A. (2023). Performance assessment of multi-source, satellite-based and reanalysis precipitation products over variable climate of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(3), 1341-1354. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04538-6>.
- Hafizi, H. ve Şorman, A. A. (2022). Assessment of 13 gridded precipitation datasets for hydrological modeling in a mountainous basin. *Atmosphere*, 13(1), 143. <https://doi.org/10.3390/atmos13010143>.
- Jaber, A. S. (2020). Evaluating SM2RAIN and WRF reanalysis precipitation datasets over Turkey and hydrological model application (Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi).
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G. ve Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>.
- Koohi, S., Azizian, A., & Brocca, L. (2021). Spatiotemporal drought monitoring using bottom-up precipitation dataset (SM2RAIN-ASCAT) over different regions of Iran. *Science of the Total Environment*, 779, 146535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146535>.
- Lai, Y., Tian, J., Kang, W., Gao, C., Hong, W., & He, C. (2022). Rainfall estimation from surface soil moisture using SM2RAIN in cold mountainous areas. *Journal of Hydrology*, 606, 127430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127430>.
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., & Sorooshian, S. (2017). Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 169-181. <https://doi.org/10.5194/hess-21-169-2017>.
- Martinez, J. (1975). Snowmelt-runoff model for stream flow forecasts. *Hydrology Research*, 6(3), 145-154. <https://doi.org/10.2166/nh.1975.0010>.
- Peker, I. B. ve Şorman, A. A. (2021). Application of SWAT using snow data and detecting climate change impacts in the mountainous eastern regions of Turkey. *Water*, 13(14), 1982. <https://doi.org/10.3390/w13141982>.
- Puca, S., Porcu, F., Rinollo, A., Vulpiani, G., Baguis, P., Balabanova, S., ... ve Gattari, F. (2014). The validation service of the hydrological SAF geostationary and polar satellite precipitation products. *Natural hazards and earth system sciences*, 14(4), 871-889. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-871-2014>.
- Pradhan, A. ve Indu, J. (2021). Assessment of SM2RAIN derived and IMERG based precipitation products for hydrological simulation. *Journal of Hydrology*, 603, 127191. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127191>.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S. ve Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>.
- Şensoy, A., Uysal, G. ve Şorman, A. A. (2023). Assessment of H SAF satellite snow products in hydrological applications over the Upper Euphrates Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1), 535-551. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04292-1>.
- Şensoy, A., Uysal, G., Doğan, Y. O. ve Civelek, H. S. (2023). The Future Snow Potential and Snowmelt Runoff of Mesopotamian Water Tower. *Sustainability*, 15(8), 6646. <https://doi.org/10.3390/su15086646>.

- Şorman, A. A., Uysal, G. ve Şensoy, A. (2019). Probabilistic snow cover and ensemble streamflow estimations in the Upper Euphrates Basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 67(1), 82-92. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0025>.
- URL-1: <https://blogs.egu.eu/divisions/hs/2020/10/28/water-towers-of-mesopotamia/>, 30 Mart 2024 tarihinde ulaşıldı.
- URL-2: <https://hsaf.meteoam.it/>, 30 Mart 2024 tarihinde ulaşıldı.
- URL-3: <https://harmosnow.eu/>, 30 Mart 2024 tarihinde ulaşıldı.
- USACE. (2018). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual: Version 4.3.0*. CA, USA: Hydrologic Engineering Center: Davis
- Uysal, G. ve Şorman, A. Ü. (2021). Evaluation of PERSIANN family remote sensing precipitation products for snowmelt runoff estimation in a mountainous basin. *Hydrological Sciences Journal*, 66(12), 1790-1807. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1954651>.
- Uysal, G., Şensoy, A. ve Şorman, A. A. (2016). Improving daily streamflow forecasts in mountainous Upper Euphrates basin by multi-layer perceptron model with satellite snow products. *Journal of Hydrology*, 543, 630-650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.037>.
- Yılmaz, M., Amjad, M., Bulut, B., Yılmaz, M. T. Uydu Kaynaklı Yağmur Verilerinin Hata Oranlarının Deniz Kıyılarına Olan Uzaklığa Bağlı Analizi. *Teknik Dergi*, 28(3), 7993-8005. <https://doi.org/10.18400/tekderg.306970>.



## İĞDIR İLİ ARALIK İLÇESİ SELLERİNİN GPM İÇİN UYDULARDAN BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ VERİLER (IMERG) KULLANILARAK ANALİZİ

Ramazan Koçak<sup>1</sup>, Senayi Dönmez<sup>2</sup>, Ahmet Emre Tekeli<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 16. Bölge Müdürlüğü, ramazankocak111@gmail.com

<sup>2</sup>İğdir Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, senayi.donmez@igdir.edu.tr

<sup>3</sup>İğdir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, aemre.tekeli@igdir.edu.tr

### Özet

İğdir ili Aralık ilçesinde meydana gelen sellerin uluslararası yollar, tarım arazileri ve insan yaşamı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Sellerin incelenmesi, analizi ve tahmini iklim değişimi ile beraber artması beklenen afetlerin etkisini azaltmak için önem arz etmektedir. Seller analiz edilirken kullanılan noktasal yer yağış gözlemleri zamana, konuma ve yüksekliğe bağlı olarak kısıtlı bir alan için geçerli olduğundan taşkınların analizi ve tahmini için yetersiz kalmaktadır. 2000'li yıllardan itibaren uydu verilerinin kullanımı ile topografyadan nispeten daha az etkilenen yağış verileri üretilmeye başlanmıştır. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 1997-2014 yılları 0,25°x0,25° konumsal çözünürlükte ve 3 saatlik zamansal çözünürlükte çeşitli yağış ürünleri sağlamıştır. Global Precipitation Measurement (GPM) uydusu, Şubat 2014'ten beri artan konumsal ve zamansal çözünürlüklerle (0,1°x0,1° ve 0,5 saat) çeşitli yağış ürünleri sağlayarak TRMM uydusunun misyonunu sürdürmektedir. Bu çalışmada, Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) ilk ürünlerine ait yağış verileri ile 2014-2021 yılları arasında, İğdir ili Aralık ilçesinde meydana gelen seller incelenmiştir. Analizlerde Sabit Eşik Değer (SED), İğdir Sel İndeksi (İSİ) ve Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF) yöntemleri kullanılmıştır. SED yöntemi ile sabit eşik değeri 12,2 mm olarak elde edilmiş ve meydana gelen sellerin SED yöntemi ile tespit edilemediği görülmüştür. İSİ'nin 1'den büyük olan değerleri dikkate alındığında kaydı bulunan üç selden sadece bir sel tespit edilmiştir. KDF yönteminin İSİ'den daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yağışa ek olarak sel oluşumunda etkili olan toprak nemi parametresinin de dahil edilmesiyle yanlış sel uyarılarının azaltılabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle gelecek çalışmalarda İğdir ili Aralık ilçesindeki taşkınlar analiz edilirken bölgenin mikroklima özellikleri ve toprak yapısı da göz önünde bulundurulmalıdır.

**Anahtar Kelimeler:** GPM, IMERG, Sel, İğdir, Aralık, Uzaktan Algılama

## ANALYSIS OF ARALIK TOWN IN İĞDIR PROVINCE FLOODS USING THE INTEGRATED MULTI-SATELLITE RETRIEVALS FOR GPM (IMERG) DATA

### Abstract

The floods occurring in Aralık town of İğdir province have negative effects on international roads, agricultural lands, and human life. The investigation, analysis, and prediction of floods are important to reduce the impact of disasters expected to increase with climate change. Since point rainfall observations used in flood analysis are valid for a restricted area depending on time, location, and elevation, they are insufficient for analysis and estimation of floods. With the availability and use of satellite data since 2000s, rainfall products that are not affected by topography are being produced. Between 1997 and 2014, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) provided various precipitation products with 0.25°x0.25° spatial and 3-hour temporal resolutions. Global Precipitation Measurement (GPM) satellite continues the mission of TRMM by providing various precipitation products with increased spatial and temporal resolutions (0.1°x0.1° and 0.5 hour) since February 2014. In this study, floods that occurred in Aralık district of İğdir province between 2014-2021 were investigated using the Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Early Precipitation data. Constant Threshold (CT), İğdir Flood Index (IFI), and Cumulative Distribution Function (CDF) methods are used in the analysis. A constant threshold value of 12.2 mm was obtained with the CT method, and it was observed that the floods that occurred could not be detected with the CT method. Only out 1 of the 3 recorded floods could be detected with IFI greater than 1. It was seen that the CDF gave better results than IFI. It is thought that false flood warnings can be reduced by including the soil moisture parameter, which is effective in flood formation, in addition to precipitation. Thus, soil structure and microclimate characteristics of Aralık town of İğdir province should be included in flood investigations of the region.

**Keywords:** GPM, IMERG, Flood, İğdir, Aralık, Remote Sensing

**Sorumlu Yazar:** Ramazan Koçak

**Geliş Tarihi:** 7 Aralık 2023

**Kabul Tarihi:** 3 Nisan 2024

**Yayın Tarihi:** 3 Temmuz 2024

**Atıf Şekli:** Koçak, R., Dönmez, S., Tekeli, A.E. (2024). İğdir İli Aralık İlçesi Sellerinin GPM İçin Uydulardan Bütünleştirilmiş Veriler (IMERG) Kullanılarak Analizi, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 13-26.

**Makale Tipi:** Araştırma Makalesi

**e-ISSN:** 3023-8560

## GİRİŞ

İklim değişiminin tarımsal üretimi, gıda güvenliğini, canlı türlerinin soylarının tehlikeye girmesini, viral bulaşıcı hastalıkların yayılımını, böcek istilalarını (Dino ve Akgül, 2019), kıyı tahribatını, kuraklığı, sıcaklık stresini, orman yangınlarını, atmosferik patenlerin değişimini, deniz seviyelerindeki artışları, afetlerin meydana gelme sıklık ve şiddetini etkilediği bilinmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Ayrıca, küresel iklim değişimi ile birlikte muhtemel aşırı yağışların sıklığının ve sel riskinin artması beklenmektedir (Tabari, 2020). Bu bağlamda, iklim değişimine uyum sağlanabilmesi için iklim değişimi anlaşılmalı ve gelecek için tutarlı projeksiyonlar oluşturulmalıdır.

Uluslararası kayıtlara göre biyolojik ve teknolojik afetler hariç son yirmi yılda 7348 tane afet meydana gelmiştir. Ayrıca, toplam 1,23 milyon insan afetlerden dolayı hayatını kaybetmiştir. Bu sayılar önceki yirmi yıl ile karşılaştırıldığında afetlerin sayısı ve verdiği zararın arttığı görülmektedir. Tablo 1’de son yirmi yılda önceki yirmi yıla göre doğal afetlerin sayısı ve etkilerinin artışı ortaya konmuştur (United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2023).

**Tablo 1.** Doğal afetlerin sayısı ve sebep olduğu küresel kayıplar (1980-1999/2000-2019) (UNDRR, 2023)

Tarih	Rapor Edilen Afet Sayısı	Seller (Sayı-Yüzde)	Can Kaybı	Etkilenen İnsan	Ekonomik Kayıp (ABD \$)
1980-1999	4212	1389-%33	1,19 milyon	3,25 milyon	1,63 trilyon
2000-2019	7348	3254-%44	1,23 milyon	4,03 milyon	2,97 trilyon

Son yirmi yılda seller 651 milyar ABD Doları maddi kayba sebep olmuştur. Ayrıca afetlerden etkilenen insanların tamamının %41’ini sellerden etkilenen insanlar oluşturmaktadır (UNDRR, 2023).

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından 2023’te yayınlanan ve Türkiye’de gerçekleşen sellerin etkilerinin araştırıldığı çalışmada, sel etkisinin meydana geldiği şehrin nüfus ve tarımsal yoğunluğuna göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. 8-12 Eylül 2009 tarihlerinde İstanbul’da gerçekleşen selde 32 can kaybının yanı sıra 3816 konut ve 1490 iş yeri zarar görmüştür. 22 Eylül 2010 tarihinde Konya’ya bağlı Bozkır ilçesinde gerçekleşen selde ise 485 dekar tarımsal arazi zarar görmüş, herhangi bir can kaybı yaşanmamıştır (SYGM, 2023). Seller meydana geldikleri bölgede toprak verimi, toprak kirliliği, tuzluluk, tarım, hayvancılık, insan sağlığı, içilebilir su miktarı, biyoçeşitlilik ve ekosistem konularında olumsuz etkilere sebep olabilmektedir (Jonkman ve Vrijling, 2008; SYGM, 2023).

Sellerin ortaya çıkmasına sebep olan tetikleyici faktörler; meteorolojik faktörler, jeomorfolojik faktörler ve yüzey durumu şeklinde sınıflandırılabilir (Dölek, 2013). Çalışmada meteorolojik faktörlerden olan yağış şiddeti incelenmiştir. Yağış verileri noktasal gözlem istasyonları, uzaktan algılama sistemleri ve iklim modelleri olmak üzere üç yöntemle elde edilebilmektedir. Yağış miktarı ölçümünde kullanılan klasik yer-gözlem sistemleri sel afeti sırasında veri aktarımında, sonrasında bakım onarımının sebep olacağı maliyetler, ekonomik sebeplere bağlı olarak sayıca nispeten az ve kentsel alanlara daha yakın konumlandırılması gibi dezavantajlara sahiptir. Uydu verileri ile yağış verisi toplamının da ilk ölçümde operasyonel, atmosferik ve yersel şartlardan kaynaklı hatalı veri üretmek gibi dezavantajları vardır. Bu bağlamda yer gözlemi destekli, uydu sistemlerinden elde edilen yağış verileri ile taşkın izleme ve tahmin sistemleri hakkında araştırmaların sayısı artmaktadır (Tekeli, 2015; Yılmaz vd., 2017; Maggioni vd., 2021). Global Precipitation Measurement (GPM) misyonu, yeni nesil küresel yağmur ve kar gözlemlerini sağlayan uluslararası bir uydu ağıdır. Tropikal Yağış Ölçümü Görevi (TRMM) başarısı üzerine inşa edilen GPM konsepti, meydana gelen yağışı ölçmek için gelişmiş bir radar sistemi taşır. GPM çekirdek uydusunun yörüngeye oturtularak gözlem yapmasının sağlanması prensibine dayanır ve küresel gözlemlere imkan sağlar. Küresel olarak iyileştirilmiş yağış ölçümleri sayesinde GPM misyonu, Dünya’nın su ve enerji döngüsünün daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, doğal riskler ve afetlere neden olan aşırı yağışların tahminini iyileştirmek için doğru ve zamanında yağış bilgilerini elde etme ve kullanma imkanlarını genişletmeye yardımcı olmuştur (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2023a).

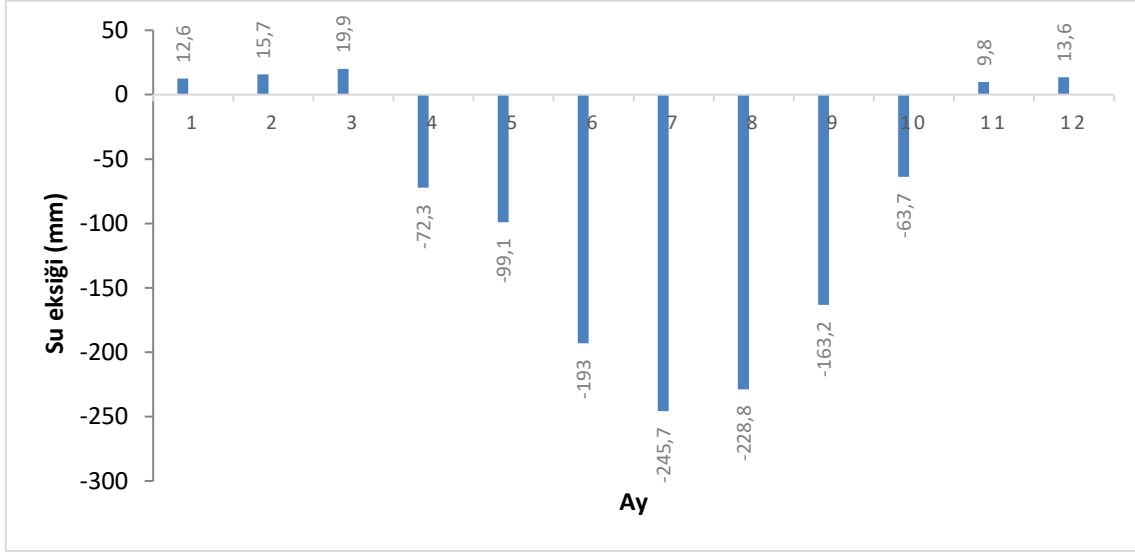
GPM farklı bir dizi yağış verileri üretmektedir. Üretilen bu verilerden; Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM–GPM için Uydulardan Bütünleştirilmiş Veriler (IMERG) yağış verisi diğer uydulara göre daha doğru sonuçlar verdiği için (Amiad, 2020) bu çalışmada tercih edilmiştir. Çalışma sel analizini içerdiğinden IMERG veri grubunda ilk veriler (Early) olarak tanımlanan ve uydu gözlemleri elde edildikten sonra en kısa sürede yayınlanan veriler temel veri seti olarak seçilmiştir.

Çalışmada, IMERG ilk veriler kullanılarak Iğdır ili Aralık ilçesinde gözlemlenmiş sel olayları incelenip sel tehlikesini tetikleyen yağış değerleri tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilecek bulgular, çalışmanın devamı niteliğinde sonraki çalışmalara ve geliştirilmesi düşünülen sel erken uyarı sistemlerine temel oluşturacaktır.

## ÇALIŞMA ALANI VE VERİLER

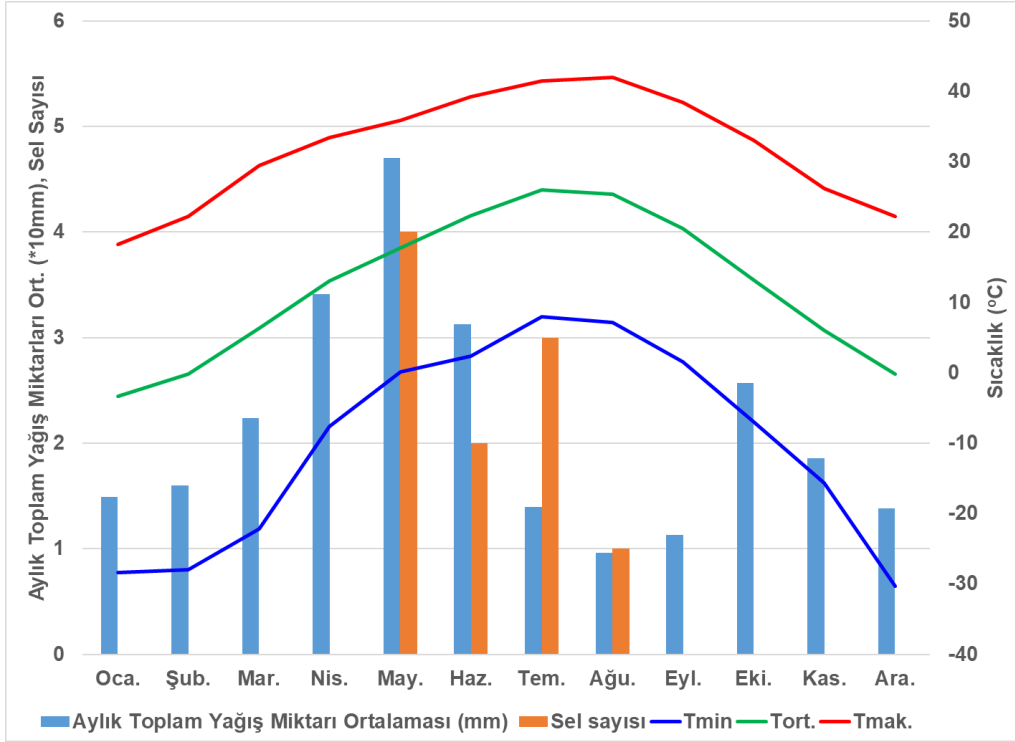
### Çalışma Alanı

Çalışma alanı Türkiye'nin en doğusunda 44,12° - 44,36° Doğu boylamları ile 39,43° - 39,54° Kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Çalışma alanı yaklaşık 761,13 km<sup>2</sup> yüzeye sahiptir ve 812 ile 5137 metre aralığındaki yükseklikleri barındırmaktadır. Iğdır şehri çevresine nispeten düşük rakıma sahip olduğundan, etrafında bulunan yükseltilerin arasında kalmıştır ve mikroklima özelliğine sahiptir. Iğdır ili, Merkez (17100) Otomatik Meteorolojik Gözlem İstasyonu (OMGİ)'nden elde edilen uzun yıllar (1990-2019) verileri ile aylık toplam yağış ve açık yüzey buharlaşma ortalamaları farkı alınarak Iğdır ili için su bütçesi bilgisi elde edilerek Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Iğdır aylık su eksikliği (1990-2019 ortalama değerleri)

Konya havzası ve Doğu Akdeniz'in bazı kısımları ile birlikte Iğdır ovası, toprak nemi eksikliğinin yanı sıra kurak ve yarı kurak olması sebebiyle Sub-tropikal step iklimi (BSk) sınıfındadır (Türkeş, 2020). Iğdır ili, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (MGM) yayınladığı iklim sınıflandırma katsayılarından Aydeniz iklim sınıflandırmasına göre çok kurak, Erinç iklim sınıflandırmasına göre kurak ve DeMartonne ile Trewartha iklim sınıflandırmalarına göre yarı kurak iklim sınıfındadır (MGM, 2023a). Merkez/Iğdır (17100) istasyonunda 1941-2022 yılları arasında ölçülen verilere göre Iğdır'ın yıllık ortalama sıcaklığı 11-12°C'dir. Ekstrem sıcaklıklar minimum -31°C, maksimum ise 42°C'dir. Seller Mayıs-Ağustos ayları arasında görülmüştür (Şekil 2). Bu mevsimde yerel gök gürültülü sağanak yağışlar bölgede hakim yağış türüdür. Kumulonimbus bulutlarından meydana gelen gök gürültülü sağanak yağışlar su ihtiyacının önemli bir kısmını karşılamının yanı sıra şiddetli yağışlar üretebilmesi sebebiyle ani sellere sebep olabilmektedir (Cotton vd., 2011). Ayrıca bazı sellerin Ağrı dağından buzul erimelerinden beslendiği bilgisi saha araştırması yapılırken elde edilmiştir. Toprak yüzeyinin sel ve erozyonlar ile taşınması, toprak karışımını bozarak geçimini daha çok tarım ve hayvancılıkla sağlayan yerel halka problem oluşturmaktadır.



Şekil 2. Aylık minimum, ortalama ve maksimum sıcaklık (°C), aylık toplam yağış miktarları ortalaması (\*10 mm) ve Iğdır'da gözlenen sel sayıları

## Veriler

Çalışmada kullanılan IMERG verilerine NASA'nın web sitesinden (<https://gpm.nasa.gov/data>) ulaşılmıştır. IMERG verileri  $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$  konumsal ve 0,5 saat zamansal çözünürlüktedir. IMERG verileri ilk (early), geç (late) ve son (final) olarak üç farklı şekilde üretilmektedir. Uydu taramasından 4 saat, 14 saat ve 3,5 ay sonra sırasıyla ilk, geç ve son veriler kullanıcılara sunulmaktadır. İlkten son ürüne doğru olan zamandaki uzama diğer uydu ölçümlerinin (kızıl ötesi, mikrodalga) ve plüviyometre değerlerinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır (NASA, 2023b). Çalışmada ilk verilerinin kullanılma sebebi sel tahminleri yapabilmek için kullanılacak gerçek zamanlıya en yakın IMERG veri tipi olması ve bu verilerin daha çok geleceğe dönük yağış tahminleri yapmak amacıyla üretilmiş olmasıdır (Mazzoglio, 2022).

Çalışmada, kullanılan OMGİ verileri MGM'den temin edilmiştir. Iğdır ilinde,  $39^{\circ} 55' K$ ,  $44^{\circ} 03' D$  koordinatlarında yer alan Merkez/Iğdır (17100) ve  $39^{\circ} 52' K$ ,  $44^{\circ} 30' D$  koordinatlarında yer alan Aralık/Iğdır (18195) OMGİ'lerin verileri kullanılmıştır.

Aralık ilçesinde, 2014-2021 yılları arasında meydana gelen sellerin tarihleri geçmiş haber kaynakları taranarak elde edilmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur.

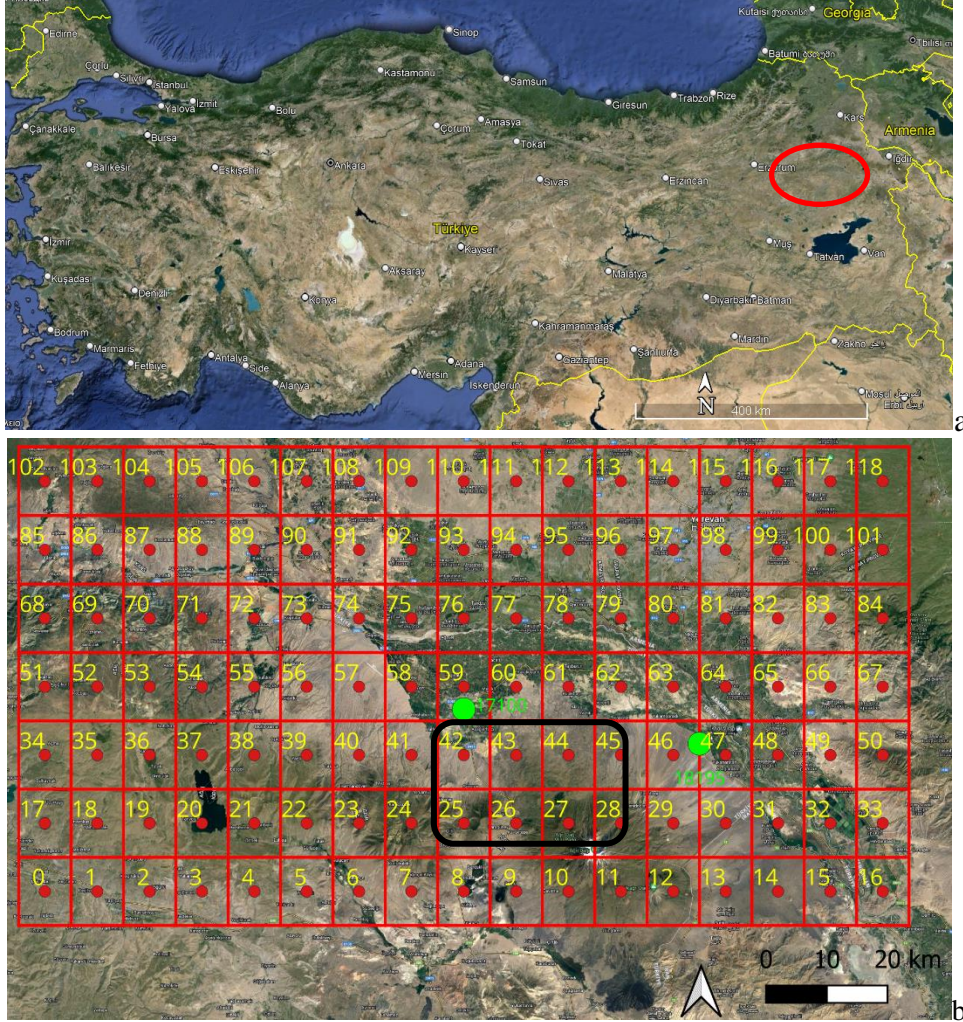
Tablo 2. Aralık İlçesindeki Sel Tarihleri

Sel Tarihi (Gün.Ay.Yıl)	Selin Gerçekleştiği Yer
05.06.2015	Aralık, Merkez
07.05.2018	Aralık, Gödekli
23.05.2021	Aralık, Gödekli

NASA'nın resmi web sayfasından ulaşılan verilerden Geospatial Data Abstraction Library-Konumsal Veri Ayırma Kitaplığı (GDAL) programı ile GPM piksellerinden Iğdır ili Aralık ilçesi ile eşleşen veriler ayıklanmış



ve işlenen veriler çalışmada kullanılmıştır. Şekil 3a'da Iğdır ilinin Türkiye'deki konumu ve Şekil 3b'de Iğdır ilini kapsayan GPM pikseller gösterilmiştir. Şekil 3b'deki siyah dikdörtgen ile gösterilen 27-30 ila 44-47 numaralı pikseller çalışma alanını kapsamaktadır.



Şekil 3. Türkiye'de Iğdır (a) ve çalışma alanını kapsayan GPM IMERG pikselleri <27-30 ve 44-47 pikselleri Aralık ilçesini kapsamaktadır> (b)

## YÖNTEM

Kuramsal temeller dikkate alınarak, çalışmada Sabit Eşik Değer (SED) (Asante vd., 2007; Hamada vd., 2014; Tekeli, 2015) Iğdır Sel İndeksi (İSİ) (Alfieri vd., 2011; Tekeli ve Dönmez, 2016; Tekeli ve Fouli, 2016) ve Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF) (Tekeli ve Fouli, 2016; Dönmez ve Tekeli, 2017) analizlerinin yapılarak, Iğdır ili Aralık ilçesi sellerinin incelenmesi için uygun olduğu düşünülmüş ve analizler yapılmıştır.

### Sabit Eşik Değer (SED)

SED sayısal yöntemler kullanarak elde edilen sabit bir yağış değerini temsil etmektedir. MGM belirli sürede belirli bir miktar ve üzerinde gerçekleşen yağışları şiddetli yağış olarak tanımlamıştır ve bunu Eşitlik 1 ile formüleştirmiştir. Sel ve taşkınların vereceği zarara karşı daha etkin önlemler alınabilmesi için bu yağış değerinin doğru tahmin edilmesi son derece önem arz etmektedir (MGM, 2023b).

$$R = \sqrt{5t + \left(\frac{t}{24}\right)^2} \quad (1)$$



Eşitlik 1’de;  $R$  ve  $t$  sırasıyla milimetre ve dakika birimleriyle yağış miktarını ve süresini göstermektedir. IMERG ilk verileri 30 dakikalık olduğundan Eşitlik 1, şiddetli yağış ( $R$ ) 12,2 mm verir. Çalışmada, elde edilen bu SED değeri (12,2 mm) ile çalışma alanındaki IMERG 27-30 ila 44-47 pikselleri içine düşen tüm veriler karşılaştırılarak, bu değeri aşan veriler olup olmadığı kontrol edilmiştir.

### **İğdır Sel İndeksi (ISİ)**

Dönmez ve Tekeli (2017) tarafından elde edilen Gaziantep Taşkın İndeksi (GATİ) baz alınarak elde edilen Eşitlik 2’de verilen ISİ denkleminde;  $N$  veri sayısını,  $P_i$  yağış verisini,  $Max(P_i)$  ise ilgili aya ait maksimum yağış verisini temsil etmektedir. The European Precipitation Index based on simulated Climatology (EPIC) kullanılarak yapılan çalışmalarda taşkın olan zamanlarda EPIC değerinin 1 ve 1,5 üzerinde olduğu bilindiğinden (Alfieri ve Thielen, 2015) GATİ kullanılırken de bu değerler üzerine odaklanılarak değerlendirme yapılmıştır (Dönmez ve Tekeli, 2017). Çalışmada Aralık ilçesini kapsayan IMERG piksellerindeki veriler için ISİ değerleri hesaplanarak, sel tarihleri ile indeks değerleri karşılaştırılmıştır.

$$ISİ = \frac{P_i}{\frac{\sum_{i=1}^N Max(P_i)}{N}} \quad (2)$$

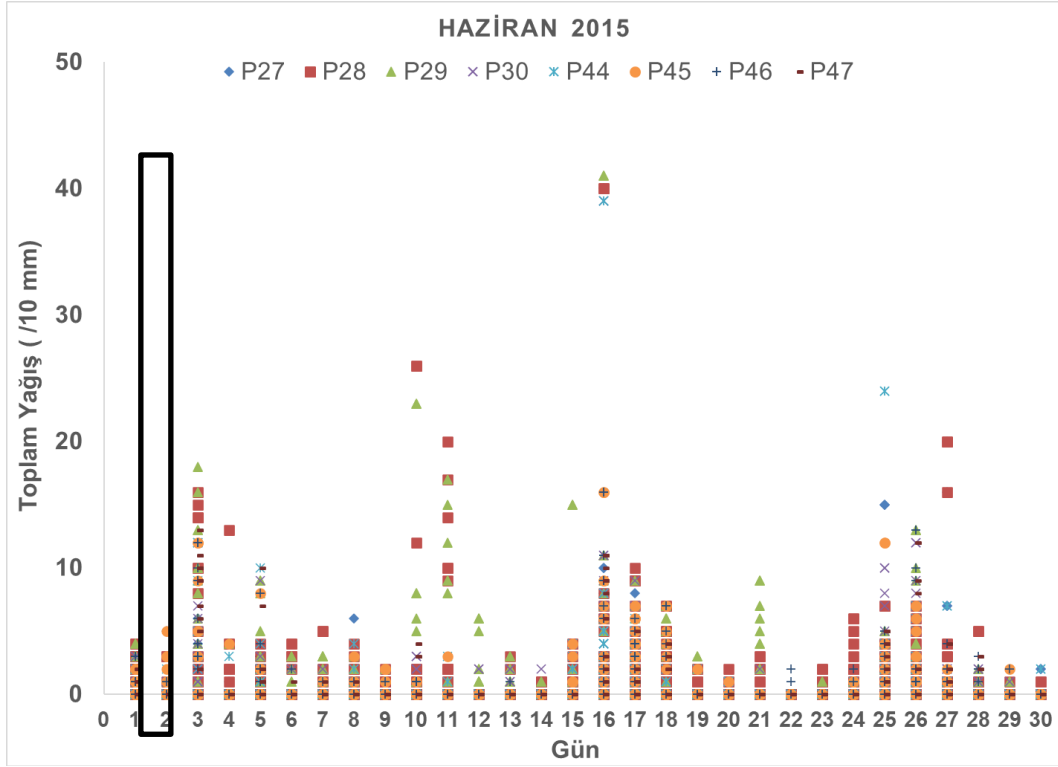
### **Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF)**

KDF, bir rassal değişkenin veya olayın belirli bir değeri veya daha küçük bir değeri alması olasılığını gösteren fonksiyondur. Çalışma süreci olan 2014-2021 periyodu için çalışma alanındaki her bir IMERG pikseli için üzerine gelen yarım saatlik yağış değerleri aylık olarak gruplandırılmış ve KDF grafikleri oluşturulmuştur. Literatür taraması yapıldığında İğdır ili iklimine benzer karasal iklime sahip şehirler için sel ve taşkın analizi yapılırken %90 ve %99 KDF değerlerinin eşik değer olarak seçildiği görülmüştür (Tekeli ve Fouli, 2016; Dönmez ve Tekeli, 2017). Sel ve taşkın analizinde kullanmak için KDF’nin %90 ve %99 değerlerine işaret eden yağış değerlerini bulmak amacıyla çalışma alanında (27-30 ve 44-47 pikselleri) sellerin meydana geldiği Mayıs-Haziran aylarında IMERG ilk verileri kullanılarak KDF grafikleri elde edilmiştir.

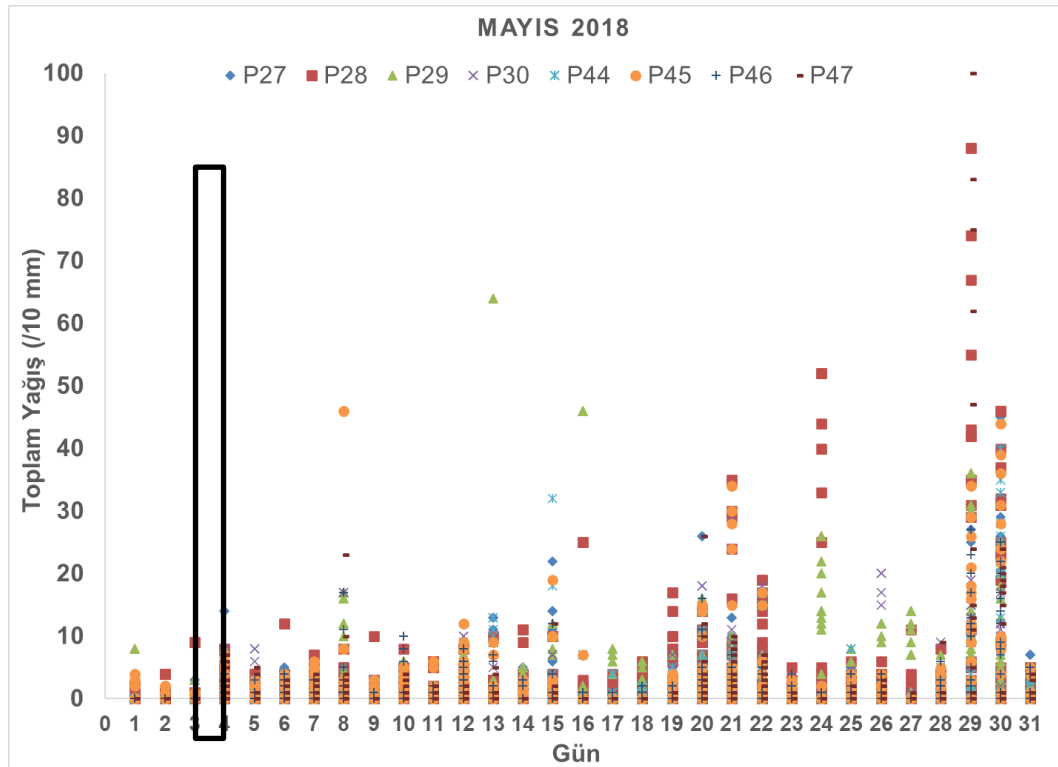
## **BULGULAR**

### **Sabit Eşik Değer (SED)**

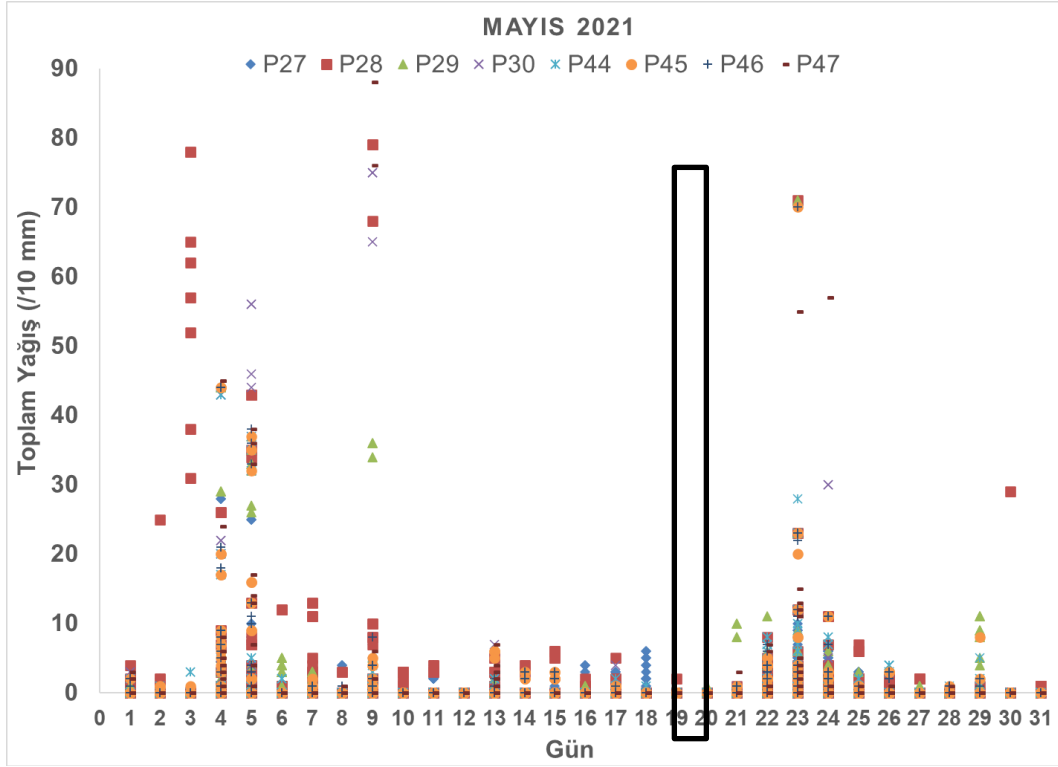
Çalışma alanındaki piksellerin IMERG ilk verilerin dağılımı sellerin vuku bulduğu Haziran 2015, Mayıs 2018 ve Mayıs 2021 ayları için Şekil 4-5-6’da sırasıyla gösterilmiştir. Sel günleri ilgili şekillerde siyah kutu ile işaretlenmiştir. Çalışma alanını kapsayan GPM piksellerinde tespit edilen sel tarihlerine karşılık gelen yağış değerlerinin; Eşitlik 1’den hesaplanan sabit eşik değere (12,2 mm) göre eşit veya büyük değerler olmadığı görülmüştür. Ayrıca, çalışma alanı içerisinde yer alan Aralık OMGI günlük yağış verileri de incelenmiş ve sabit eşik değeri aşan bir yağış verisine rastlanmamıştır.



Şekil 4. 2015 Haziran ayı için IMERG ilk verileri



Şekil 5. 2018 Mayıs ayı için IMERG ilk verileri



Şekil 6. 2021 Mayıs ayı için IMERG ilk verileri

### İğdır Sel İndeksi (İSİ)

IMERG ilk verilerinin İSİ hesaplamaları için çalışma alanında yer alan her pikselin sellerin olduğu Mayıs ve Haziran ayları için maksimum değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır (Tablo 3).

**Tablo 3.** 2014-2021 Mayıs aylarında İSİ hesabında kullanılan IMERG verileri Aralık ilçesi pikselleri için en büyük 30 dakikalık yağış değerleri ortalamaları (Değerler 1/10mm)

	P27	P28	P29	P30	P44	P45	P46	P47
Mayıs	41,4	54,1	49,1	35,5	33,5	32,9	29,8	44,1
Haziran	25,1	35,5	36,1	28,6	30,6	19,4	22,8	36,5

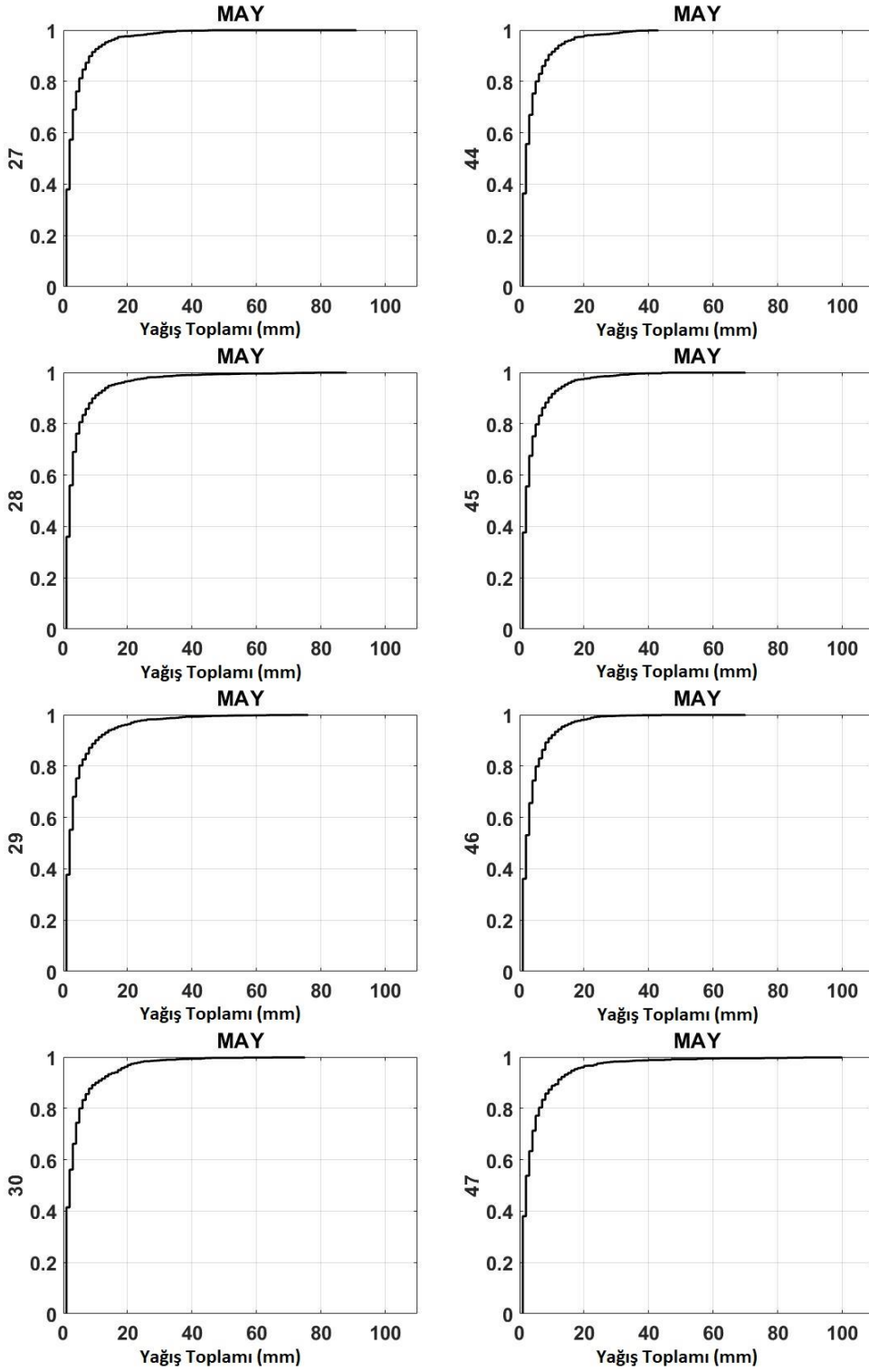
İSİ değerleri içerisinde 1'in üzerinde olanlar seçildiğinde sel tarihlerinden sadece 23.05.2021 tarihli sel tespit edilebilmiştir (Tablo 4).

**Tablo 4.** IMERG ilk verileri ile 27-30 ila 44-47 piksellerinin 23.05.2021 seli için hesaplanmış 1'den büyük İSİ değerleri

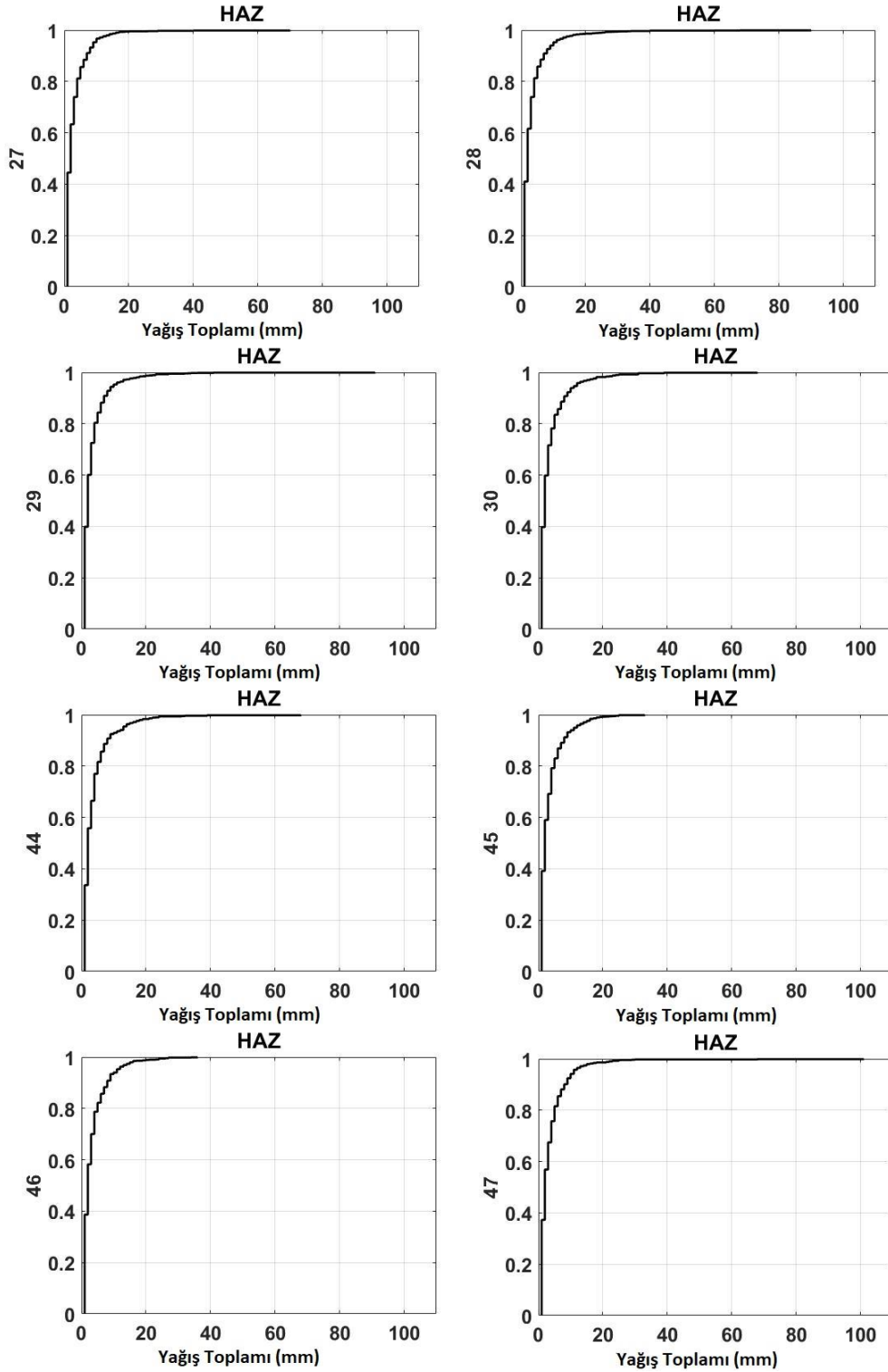
Zaman	Piksel	İSİ	Piksel	İSİ
14:30	28	1,31	29	1,44
17:30	47	1,25	---	---
18:00	47	1,25	---	---

### Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF)

IMERG ilk verileri ile KDF değerleri hesaplanmış, 27-30 ila 44-47 pikselleri için grafikleri çizdirilerek Şekil 7 ve 8'de sunulmuştur. Mayıs ayı için grafiklerin oluşturulmasında her pikselde 11904 tane ilk verisi kullanılırken, Haziran ayı için her pikselde 11517 tane ilk verisi kullanılmıştır.



Şekil 7. İlk IMERG verileri ile Mayıs ayı KDF dağılımları (x-ekseni 1/10mm)



Şekil 8. İlk IMERG verileri ile Haziran ayı KDF dağılımları (x-ekseni 1/10mm)

Çalışmalarında KDF'lerin benzer çıkmadığını söyleyen araştırmacılar olduğu gibi (Tekeli ve Fouli, 2016; Dönmez ve Tekeli, 2017) KDF'lerin benzer özellik gösterdiğini belirten araştırmacılar da olmuştur (Pombo ve Olivera, 2015).

05.06.2015 ve 23.05.2021 tarihli seller IMERG ilk verilerinden %90 ve üzerindeki KDF değerleri ile tesbit edilebilmiştir. 23.05.2021 tarihinde meydana gelen selde IMERG ilk verileri aynı zamanda %99 üzerindeki KDF değerleri içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



Hatalı sel alarmlarını en aza indirmek için MGM'ye ait Aralık ilçesi OMGİ verilerinden günlük toplam yağış miktarları alınıp analizlerde kullanılmıştır. Aralık ilçesindeki OMGİ (18195) içinde bulunduğu 47 numaralı GPM IMERG pikseli için hesaplanmış, ISİ ve KDF değerleri IMERG ilk verileri için sel öngörüsü sağlayan ISİ ve KDF tarihleri bir araya getirilmiştir (Tablo 5).

**Tablo 5.** İlk IMERG verileri ile 47. Piksel için ISİ, KDF analizleri ve OMGİ yağış verisinin karşılaştırması

Tarih (Gün.Ay.Yıl)	ISİ			KDF		Aralık OMGİ Yağış Verisi $\geq 0$
	$\geq 1,0$	$\geq 1,5$	$\geq 2$	$\geq \%90$	$\geq \%99$	
29.05.2018	+	+	+	+	+	+
04.05.2021	+			+		+
09.05.2021	+	+		+	+	+
<b>23.05.2021</b>	+			+	+	+
24.05.2021	+			+	+	-
04.06.2018	+	+	+	+		+
21.06.2019	+	+		+		+

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Çalışmada, IMERG ilk yağış verileri kullanılarak Aralık ilçesinde 2014-2021 yılları arasında gerçekleşen sel olayları incelenmiştir. Sabit Eşik Değer (SED), İğdır Sel İndeksi (ISİ) ve Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (KDF) yöntemleri kullanılarak Aralık ilçesini etkileyen piksellerden (27-30 ve 44-47 pikseller) sel alarmı oluşup oluşmadığı kontrol edilmiştir.

SED analizi sonucunda elde edilen 12,2 mm değerini geçen IMERG ilk verisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu değer (12,2 mm) çalışma alanında sel oluşumuna sebep olan yağış değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin, uzun yıllar yıllık toplam yağış miktarının Türkiye geneli ve Doğu Anadolu bölgesine kıyasla az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Karaoğlu, 2011). Ayrıca, İğdır ovası çevresinde bulunan görece yüksek rakımlı (Erzurum 1900 m, Ağrı 1640 m, Kars 1760 m) bölgelerin arasında 850 m rakıma sahip olmasından dolayı mikroklima özelliği göstermektedir (Yaltı ve Aksu, 2019). SED hesaplamalarının bölgenin iklim özellikleri gözetilerek yapılmasının ve bölgesel eşik değerlerin elde edilerek kullanılmasının daha iyi sonuç vereceği bulgusu Hamada ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmanın bulguları ile uyumludur.

Hesaplanan ISİ değerlerinin 1'den büyük olanları incelendiğinde kaydına ulaşılan üç selden sadece bir tanesinin tespit edilebildiği görülmüştür. Bunun temel sebebi ISİ konvektif-ani yağışları tespit etmekte başarılıyken, uzun süreli ve düşük şiddetli yağışları tespit etmekte başarısız olmasıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar sellerin tetiklenmesinde başlangıç suyu, sel bölgesindeki eğim, toprak nemi ve kar erimelerinin etkili olacağından söz edilmiştir (Alfieri vd., 2011; Liu, 2023). Tespit edilemeyen diğer iki selin de uzun süreli ve düşük şiddetli yağışların tetiklediği ve Ağrı dağından buzul erimesiyle beslendiği düşünülmektedir.

Çalışmada, ulaşılabilen sel kayıtlarının zamansal ve konumsal çözünürlüklerinin sınırlı olduğu görülmüştür. Bu, kaydına ulaşamayan sellerin de olma ihtimalini arttırmaktadır. Ayrıca, ulaşılan sel olayları ile ilgili zaman ve konum bakımından hatalı sel kayıtları olma ihtimali gibi olumsuz durumlar sel tahmin çalışmalarında gerek global (Alamri, 2011; Borga vd., 2014; Tekeli, 2017) gerekse Türkiye ölçeğinde (Dönmez ve Tekeli, 2017) karşılaşılan zorluklar olarak belirtilmiştir. Analizler sonucunda yanlış alarmları azaltmak için Aralık OMGİ yağış verilerinin kullanılması da olumlu sonuç vermiştir. Bu durum, teknolojik gelişmeler ile yeni ölçüm teknikleri bulunsa da yer gözlem ve ölçümlerinin gerekliliğini ve önemini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, SED yönteminin bölgesel iklim verileri kullanılarak güncellenmesi, gelecek çalışmalarda daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir. ISİ yöntemi ile yanlış alarmların azaldığı görülmüştür. KDF ile yanlış sel alarmları azalırken, SED ve ISİ yöntemlerine göre daha fazla sel tespit edilebilmiştir. Gelecek çalışmalar için yağış verileri ile birlikte toprak nemi parametresini de analizlere dahil etmenin (Tekeli ve Fouli, 2017) yanlış sel alarmlarını azaltarak daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Ayrıca, çalışma alanı için yapılacak çalışmalarda bölgenin mikroklima özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmanın dağlık alanlarda GPM verilerinin kullanımı (Derin ve Yılmaz, 2014) konusunda gelecek çalışmalar için bir referans olabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Alamri, Y. A. (2011). Rains and floods in Saudi Arabia. Crying of the sky or of the people? Saudi Medical Journal, 32(3), 311-313.
- Alfieri, L., Velasco, D., ve Thielen, J. (2011). Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events. Advances in Geosciences, 29, 69-75.
- Alfieri, L., ve Thielen, J. (2015). European precipitation index for extreme rain-storm and flash flood early warning. Meteorological Applications, 22(1), 3-13.
- Amiad, M. (2020). Evaluating and merging model and satellite-based precipitation products over varying climate and topography. Ankara, Türkiye: Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- Asante, K. O., Macuacua, R. D., Artan, G. A., Lietzow, R. W., ve Verdin, J. P. (2007). Developing a flood monitoring system from remotely sensed data for the Limpopo basin. Geoscience and Remote Sensing, 45(6), 1709-1714.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., ve Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. Journal of Hydrology, 518, 194-205.
- Cotton, W. R., Bryan, G., ve van der Heever, S. C. (2011). Cumulonimbus clouds and severe convective storms. A. P. Roger içinde, International Geophysics (s. 315-454). Academic Press.
- Derin, Y., ve Yılmaz, K. K. (2014). Evaluation of multiple satellite-based precipitation products over complex topography. Journal of Hydrometeorology, 15(4), 1498-1516.
- Dino, I. G., ve Akgül, C. M. (2019). Impact of climate change on the existing residential building stock in Turkey: An analysis on energy use, greenhouse gas emissions and occupant comfort. Renewable energy, 141, 828-846.
- Dölek, İ. (2013). Muş'ta yaşanan sel ve taşkınlara neden olan doğal faktörlerin analizi. Marmara Coğrafya Dergisi, 28, 408-422.
- Dönmez, S., ve Tekeli, A. E. (2017). Comparison of TRMM-based flood indices for Gaziantep, Turkey. Natural Hazards, 88, 821-834.
- Hamada, A., Murayama, Y., ve Takayabu, Y. N. (2014). Regional characteristics of extreme rainfall extracted from TRMM PR measurements. Journal of Climate, 27(21), 8151-8169.
- IPCC. (2023, Ocak). <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf> adresinden alındı
- Jonkman, S., ve Vrijling, J. K. (2008). Loss of life due to floods. Journal of Flood Risk Management, 1(1), 43-56.
- Karaoğlu, M. (2011). Zirai meteorolojik açıdan İç Anadolu iklim etüdü. Journal of the Institute of Science and Technology, 1(1), 97-104.
- Liu, Z. (2023). Evaluation of rainfall thresholds triggering debris flows in western China with gauged and satellite-based precipitation measurement. Journal of Hydrology, 620, 129500.
- Maggioni, V., Massari, C., ve Kidd, C. (2021). Errors and uncertainties associated with quasiglobal satellite precipitation products. S. Michaelides içinde, Precipitation Science (s. 377-390). ScienceDirect.
- Mazzoglio, P. (2022). Insights on a global extreme rainfall detection system. S. Michaelides içinde, Precipitation Science (s. 135-155). Science Direct.
- MGM. (2023a, Ekim). <https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-siniflandirmalari.aspx?m=IGDIR> adresinden alındı
- MGM. (2023b, Haziran). <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/maksimum-yagislar.aspx> adresinden alındı
- NASA. (2023a, Aralık). <https://gpm.nasa.gov/missions> adresinden alındı
- NASA. (2023b, Aralık). <https://gpm.nasa.gov/resources/faq/what-are-differences-between-imerg-early-late-and-final-runs-and-which-should-be-used> adresinden alındı
- Pombo, S., ve Olivera, R. P. (2015). Evaluation of extreme precipitation estimates from TRMM in Angola. Journal of Hydrology, 523, 663-679.
- SYGM (2023, Aralık). [https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Ta%C5%9Fk%C4%B1n%20Y%C3%B6netim%20Kitab%C4%B1/Taskin%20Yonetimi\\_16x24cm.pdf](https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Ta%C5%9Fk%C4%B1n%20Y%C3%B6netim%20Kitab%C4%B1/Taskin%20Yonetimi_16x24cm.pdf)
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. Scientific reports, 10(1), 13768.
- Tekeli, A. E. (2015). Uydu Tabanlı Yağış Verileri ile Gaziantep Taşkınlarının İncelenmesi. II. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu, (s. 400-405).
- Tekeli, A. E., ve Dönmez, S. (2016). Gaziantep sellerinin tespiti için uydu tabanlı yağış taşkın indeksinin elde edilmesi. VI. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, (s. 400-405).
- Tekeli, A. E., ve Fouli, H. (2016). Evaluation of TRMM satellite-based precipitation indexes for flood forecasting over Riyadh City, Saudi Arabia. Journal of Hydrology, 541, 471-479.

- Tekeli, A. E. (2017). Exploring Jeddah floods by tropical rainfall measuring mission analysis. *Water*, 9(8), 612.
- Tekeli, A. E., ve Fouli, H. (2017). Reducing false flood warnings of TRMM rain rates thresholds over Riyadh City, Saudi Arabia by utilizing AMSR-E soil moisture information. *Water Resources Management*, 31, 1243-1256.
- Türkeş, M. (2020). Climate and drought in Turkey. *Water Resources of Turkey*, 85-125.
- UNDRR. (2023, Haziran). <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019> adresinden alındı
- Yaltı, S., ve Aksu, H. (2019). Drought Analysis of Iğdır Turkey. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technolgy*, 7(12), 2227-2232.
- Yılmaz, M. T., Amiad, M., ve Yücel, İ. (2017). TRMM ve GPM uzaktan algılama ve ECMWF numerik model kaynaklı yağış verilerinin doğrulanması. III. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu, (s. 354-355)



## VAN GÖLÜ VE ÇEVRESİ İÇİN WRF-LAKE MODÜLÜNÜN TEST EDİLMESİ

Emirhan Cemek<sup>1</sup>, Halil Karakaya<sup>1</sup>, Duygu Aktaş Çubuk<sup>2</sup>, Yezdan Yılmaz<sup>2</sup><sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü<sup>2</sup>Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Sayısal Hava Tahmini Şube Müdürlüğü

cemek17@itu.edu.tr, halilkarakayaitu@gmail.com, daktas@mgm.gov.tr, yeyilmaz@mgm.gov.tr

**Özet**

Sayısal hava tahmin modelleri, meteorolojik değişkenlerin tahmin edilmesi, çeşitli hava olaylarının daha iyi anlaşılması vb. konularda fayda sağladığından dolayı; atmosfer bilimlerinde önem teşkil eden araçlardır. Göllerin atmosferik süreçlere etkisi, modelleme çalışmalarında dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur. Göl üzerinde birçok değişken (pürüzlülük, albedo, vb.) karaya göre farklılık göstereceğinden dolayı, göl bölgelerinde yapılacak atmosferik model çalışmalarında doğru parametrelerin seçilmesi, modelin başarısını artıracak yönde olacaktır. WRF (Weather Research and Forecasting Model), dünyada birçok ülkenin meteoroloji ofisi tarafından operasyonel olarak kullanılan bir bölgesel hava tahmin modelidir. WRF modelinin güncel versiyonunda (Versiyon 4), göllerin derin katmanlarındaki ve yüzeyindeki sıcaklıkların hesaplanmasında kullanılan bir göl modülü bulunmaktadır. Bu modül 1 boyutlu bir termal difüzyon denklemi kullanarak gölün katmanları arasındaki termal enerji transferlerini hesaplamaktadır. Bu çalışmada WRF-Lake modülünün, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün operasyonel WRF simülasyonlarına sağlayabileceği olası katkının araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak Van Gölü ve çevresi seçilmiş olup, başlangıç ve sınır koşulları ECMWF HRES model verisinden sağlanmıştır. Model konfigürasyonu MGM operasyonel WRF simülasyonlarına uygun olarak seçilmiştir. Model sonuçlarının doğrulanması MGM istasyonlarındaki ölçümler ve ERA-5 yeniden analiz edilmiş veri seti kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, ECMWF Forecast ürününde sıcak periyotta bulunan tutarsız göl yüzeyi sıcaklıkları sebebiyle "sst\_update" yönteminin başarısız model sonuçlarına sebep olduğunu göstermektedir. WRF-Lake modülünün mevcut konfigürasyonunun soğuk periyotta operasyonel simülasyonlara katkı sağlamadığı, gerçeğinden çok düşük göl yüzeyi sıcaklıkları tahmin ettiği görülmüştür. Göl modülü, "sst\_update" yönteminin kullanılmadığı sıcak periyotta kullanılabilirken, soğuk dönemde kullanılamaz durumdadır. WRF-Lake modülünün operasyonel MGM simülasyonlarında kullanılabilmesi için, modülün Türkiye için kalibrasyonu gelecek çalışmalarda ele alınmalıdır.

**Anahtar kelimeler:** Sayısal Hava Tahmini, Van Gölü, WRF-Lake

**TESTING THE WRF-LAKE MODULE FOR LAKE VAN AND ITS SURROUNDINGS****Abstract**

Numerical weather prediction models are valuable tools in atmospheric sciences, as they aid in the prediction of meteorological variables, the better understanding of various weather phenomena, and other related aspects. The effect of lakes on atmospheric processes is an important issue that should be taken into consideration in modeling studies. Since many variables on the lake (roughness, albedo, etc.) will differ compared to the land, choosing the right parameters in atmospheric model studies to be carried out in lake regions will increase the success of the model. WRF (Weather Research and Forecasting Model) is a regional weather forecast model used operationally by the meteorological offices of many countries around the world. The current version of the WRF model (Version 4) includes a lake module used to calculate temperatures in the deep layers and on the surface of lakes. This module calculates thermal energy transfers between layers of the lake using a 1-dimensional thermal diffusion equation. In this study, it is aimed to investigate the possible contribution of the WRF-Lake module to the operational WRF simulations of the General Directorate of Meteorology. Lake Van and its surroundings were chosen as the study area, and initial and boundary conditions were provided from ECMWF HRES model data. The model configuration was chosen in accordance with MGM operational WRF simulations. Validation of the model results was done using measurements at MGM stations and the ERA-5 reanalyzed data set. The results show that the "sst\_update" method causes unsuccessful model results due to inconsistent lake surface temperatures in the warm period in the ECMWF Forecast product. It has been observed that the current configuration of the WRF-Lake module does not contribute to operational simulations in the cold period and predicts lake surface temperatures that are much lower than reality. While the lake module can be used in the hot period when the "sst\_update" method cannot be used, it is unusable in the cold period. In order for the WRF-Lake module to be used in operational MGM simulations, the calibration of the module for Türkiye should be addressed in future studies.

**Keywords:** Numerical Weather Prediction, Lake Van, WRF-Lake

**Sorumlu Yazar:** Emirhan Cemek

**Geliş Tarihi:** 28 Mart 2024

**Kabul Tarihi:** 8 Haziran 2024

**Yayın Tarihi:** 3 Temmuz 2024

**Atf Şekli:** Cemek, E., Karakaya, H., Çubuk, D.A., Yılmaz, Y. (2024). Van Gölü ve Çevresi İçin WRF-Lake Modülünün Test Edilmesi, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 27-38.

**Makale Tipi:** Araştırma Makalesi

**e-ISSN:** 3023-8560

## GİRİŞ

Hava tahmini; tarımsal faaliyetlerin sürdürülmesi, güvenlik önlemlerinin alınması, enerji üretimi, ulaşım sektörünün işleyişi vb. faktörlere doğrudan etki ettiği için, bu tahminlerin zamanında ve güvenilir hazırlanması gerekmektedir. Bu tahminlerin hazırlanmasında, sayısal hava tahmin modellerinden yararlanır. Sayısal hava tahmini çalışmalarında, su yüzeylerinin ayrı değerlendirilmesi ve model parametrelerinin ayarlanması, tahmin başarısını artıracak yönde olacaktır. Ekoloji, iklim, hidroloji, turizm vb. konularda büyük bir etken olan göllerde, pürüzlülük, albedo vb. değişkenler karaya göre büyük farklılık gösterdiğinden dolayı, bölgesel çalışmalarda göllerin ayrı değerlendirilmesi, sayısal hava tahmin modellerinde önem arz etmektedir. Bu sebeple, atmosferik modellerde göl yüzeyi sıcaklıklarının çözümlenmesi; diğer meteorolojik süreçlerin tanımlanması için de kritik bir etkidir. WRF atmosferik çalışmalarda ve çeşitli meteorolojik kurumlar tarafından operasyonel olarak kullanılan bir sayısal hava tahmin modelidir. NCAR (National Center for Atmospheric Research) Mesoscale and Microscale Laboratory tarafından geliştirilen ARW (Advanced Research WRF) ve NCEP'in (National Centers for Environmental Prediction) geliştirmekte olduğu NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) olarak adlandırılan 2 adet temel versiyonu vardır. ARW versiyonu dünyada geniş ölçüde kullanılmaktadır ve birçok alandaki araştırmalar (parametrizasyon, iklim, veri asimilasyonu vb.) için tercih edilmektedir. Modelde farklı fizik paketi seçenekleri bulunmaktadır. Bunlardan biri de CLM (Community Land Model) 4.5 versiyonundan Gu ve arkadaşlarının (2015) yaptığı değişikliklerle WRF modeline entegre edilen göl modelidir (Skamarock vd., 2021). Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), WRF modelini günlük operasyonel olarak çalıştırmaktadır. Ancak bu simülasyonlarda göl modülü kullanılmamaktadır. Bu çalışmada, modülün MGM WRF simülasyonlarına sağlayabileceği olası katkının belirlenmesi amaçlanmıştır. Başlangıç ve sınır koşullarının sağlandığı veri seti olarak, ECMWF HRES kullanılmıştır. ECMWF verisinde bulunan Van Gölü sınırlarının WPS programındaki sınırlar ile uyuşmamasından kaynaklanan hataların giderilmesi için, metgrid programındaki interpolasyon seçenekleri değiştirilmiştir. Hava sıcaklığına göre belirlenen sıcak ve soğuk periyotlardan seçilen toplam 30 günlük simülasyonlar; 3 farklı model konfigürasyonu ile tamamlandıktan sonra, ERA5 yeniden analiz edilmiş veri setinin değerleriyle ve MGM'nin işletmekte olduğu meteoroloji istasyonlarının verileriyle karşılaştırılarak model sonuçlarının doğruluğunun teyit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak Türkiye'nin en büyük gölü olan Van Gölü seçilmiştir. Çalışmanın bulgularının, Türkiye'deki göl bulunan bölgelerde yapılacak olan atmosferik modelleme çalışmalarına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Göl Modeli (WRF-Lake)

WRF 4.1.5. sürümünde bulunan göl modeli, CLM 4.5 (Community Land Model) versiyonunda (Oleson vd., 2013) entegre şekilde bulunan LISSS (Lake, Ice, Snow and Sediment Simulator) modelinden (Subin vd., 2012); Gu vd. lerinin (2015) yaptığı değişikliklerle alınmıştır. Model, düşeyde 20-25 adet katman içerir. Bu katmanlar 5 adete kadar göl buzundaki kar katmanları, 10 adet su katmanları ve gölün tabanında 10 adet toprak katmanlarıdır. Göl modülü WPS'den (WRF Preprocessing System) elde edilen göl noktaları ve göl derinliği değerleriyle kullanılabildiği gibi, kullanıcının kendi tanımladığı göl noktaları ve göl derinliği ile de kullanılabilir. Göl şeması, kara yüzeyi şemasından bağımsız çalışır ve bu sayede tüm kara yüzeyi şemalarıyla birlikte kullanmak mümkündür (Skamarock vd., 2021). Göl modelinde, su katmanları arasındaki termal transferler, 1 boyutlu düzensiz termal difüzyon denklemi ile çözülür:



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \{K_m + K_{ed}\} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dz} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de, z yüzeyden itibaren derinliği,  $K_m$  moleküler difüzyon katsayısını ( $m^2s^{-1}$ ),  $K_{ed}$  eddy difüzyon katsayısını ( $m^2s^{-1}$ ), T su sıcaklığını ( $^{\circ}C$ ), c suyun hacimsel ısı kapasitesini ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ ),  $\Phi$  ise z derinliğine kadar nüfuz eden net solar radyasyonu ( $Wm^{-2}$ ) temsil etmektedir (Hostetler ve Bartlein, 1990). Göl modeli hakkındaki çalışmalar ve gelişmeler (Gu vd., 2015), (Xiao vd., 2016), (Xu vd., 2016), (Ma vd., 2019), (Wu vd., 2020), (Guo vd., 2022) çalışmalarında bulunabilir.

### Çalışma Alanı ve Model Seçenekleri

Türkiye’de 100’den fazla göl bulunmaktadır ve bu göllerin yüzölçümleri toplamı yaklaşık 9500  $km^2$ dir (Hoşgören, 1994). Bu göllerden en büyüğü olan Van Gölü, Türkiye’nin en büyük gölü olması ve literatürde WRF-Lake ile yapılan bir çalışması bulunmadığından dolayı bu çalışmada temel alınacak göl olarak belirlenmiştir. Van İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü internet adresinden Van Gölü hakkında temin edilen bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Çalışma kapsamında WRF modeli ile yapılacak simülasyonlar sonucunda WRF-Lake modülünün başarısı, Van Gölü ve çevresi için test edilmiştir.

**Tablo 1.** Van Gölü özellikleri (Van İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, t.y.)

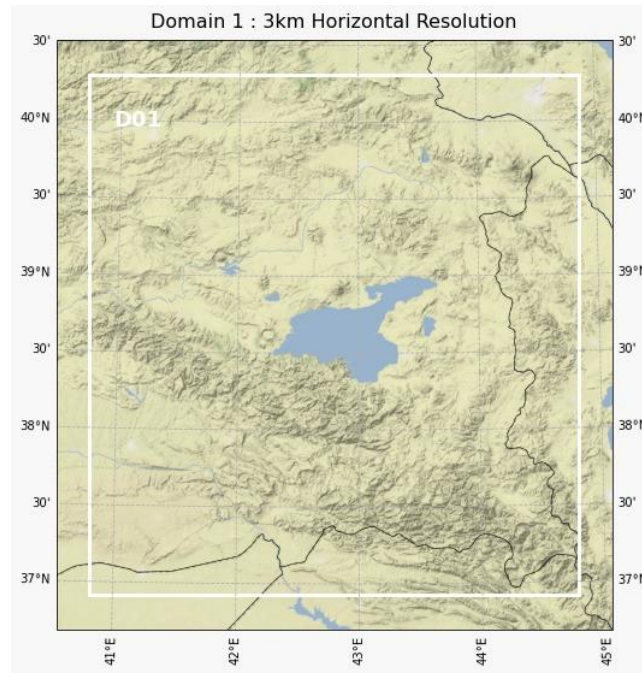
Van Gölü	
<b>Konum</b>	Van, Bitlis
<b>Göl Türü</b>	Tuzlu, Sodalı
<b>Uzunluk</b>	120 km
<b>Genişlik</b>	80 km
<b>Yüzölçümü</b>	3713 $km^2$
<b>Ortalama Derinlik</b>	171 m
<b>En Büyük Derinlik</b>	451 m
<b>Yüzey Rakımı</b>	1646 m

Simülasyon alanı  $38,62^{\circ}$  K enlemi ve  $42,797^{\circ}$  D boylamında merkezlenmiş olup, 3 km. aralıklı olacak şekilde batı-doğu doğrultusunda 118, kuzey-güney doğrultusunda ise 125 grid içermektedir. İç içe alanlar (nested domain) kullanılmamıştır. Simülasyon alanı Şekil 1’de verilmiştir. Modelde kullanılan fizik seçenekleri (Tablo 2) MGM’nin operasyonel simülasyonlarına uygunluğu göz önünde bulundurularak seçilmiştir.

Senaryolarda sıcak ve soğuk dönem olarak MGM’nin önerdiği 15 günlük aralıklar kullanılmıştır. Bu senaryolar Tablo 3’te verilmiştir. Model, operasyonel kullanıma benzer olması açısından, her bir senaryo için 15 günlük tek bir simülasyon yerine, günlük olarak 15 ayrı simülasyon ile çalıştırılmıştır.

Tablo 2. Model konfigürasyonu

Model Konfigürasyonu	
WRF Sürümü	4.1.5
Yatay Çözünürlük	3 kilometre
Düşey Çözünürlük	61 seviye (eta)
Zaman Adımı	18 saniye
Mikrofizik	WRF Single-moment 6-class Scheme
Sınır Tabaka	Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ)
Kümürlüs Parametrizasyonu	Kapalı
Kısa Dalga Boylu Radyasyon	Dudhia Shortwave Scheme
Uzun Dalga Boylu Radyasyon	RRTM Longwave Scheme
Kara Yüzeyi Şeması	Unified Noah Land Surface Model
Yüzey Tabaka	Eta Similarity Scheme
Kentsel Yüzey Fiziki	Kapalı



Şekil 1. Simülasyonlarda kullanılan çalışma alanı

Tablo 3. Çalışmada kullanılan senaryolar

Senaryo	Tarih	Özellik
S1	04.07.2021 00 UTC - 19.07.2021 00 UTC	Sıcak Periyot
S2	05.02.2022 00 UTC - 20.02.2022 00 UTC	Soğuk Periyot

Göl modelinin başarısının test edilebilmesi için simülasyonlar her tarih için 3 farklı model konfigürasyonu ile yapılmıştır. Kontrol simülasyonu (R1), modelde göl yüzeyi sıcaklıklarının simülasyon boyunca başlangıç koşulundaki değerler olarak alındığı simülasyondur. WRF modeli, varsayılan olarak deniz yüzeyi sıcaklıklarını (SST) tahmin etmemektedir. Yani R1 simülasyonu varsayılan konfigürasyon olmaktadır.

Ancak uzun süreli simülasyonlarda, zamanla değişen SST veri setinin kullanılması fayda sağlamaktadır. Modelin fizik seçeneklerinde “sst\_update” adlı seçeneğin aktifleştirilmesi; modelin, verilen SST veri setini okuyarak bu değerleri zamana bağlı olarak güncellemesini sağlar. İkinci simülasyon (R2), “sst\_update” seçeneğinin aktifleştirildiği, göl yüzeyi sıcaklıklarının saatlik olarak sınır koşulları göz önünde bulundurularak güncellendiği durumdur. Son simülasyon türünde (R3), göl yüzeyi sıcaklıkları göl modeli tarafından hesaplanmıştır. Simülasyon çeşitleri Tablo 4’te verilmiştir.

**Tablo 4.** Çalışmada kullanılan simülasyon çeşitleri

Simülasyon	Konfigürasyon
R1	SST güncelleme kapalı, göl modeli kapalı
R2	SST güncelleme açık, göl modeli kapalı
R3	Göl modeli açık

Başlangıç ve sınır koşulları için, ECMWF Operasyonel Atmosferik Model arşivinden temin edilen  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  (~9 km) çözünürlüklü Analysis (Analiz) ve Forecast (Tahmin) ürünleri saatlik olarak kullanılmıştır. Her günün ilk zaman adımı (00 UTC) Analiz ürünü, diğer zaman adımları (01-24 UTC) Tahmin ürünü olacak şekilde temin edilmiştir.

### Gözlem Verileri ve Hata Hesabı

Model sonuçlarının doğruluğunun tespit edilmesi için 2 adet veri türü kullanılmıştır. Alansal analizler için yaklaşık 27 kilometre çözünürlüğe sahip olan ERA5 yeniden analiz edilmiş veri seti kullanılmıştır. Noktasal analiz için de MGM tarafından işletilmekte olan gözlem istasyonlarının verileri kullanılarak simülasyon sonuçlarının doğruluğu test edilmiştir. Kara istasyonlarının biri göle yakın, diğeri de gölün doğusunda göle uzak olacak şekilde seçilmiştir. Van ve Bitlis illerinde bulunan toplam 4 adet göl üzerindeki meteoroloji istasyonlarının verileri de göl yüzeyi sıcaklıklarının değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Kullanılan MGM istasyonlarının konumları Şekil 2’de istasyon numaraları ve adları da Tablo 5’te verilmiştir. 2 metre yüksekliğindeki sıcaklık, göl yüzeyi sıcaklığı, yağış ve 2 metrede yükseklikteki bağıl nem değişkenleri değerlendirilmiştir. Hata hesaplamalarında Ortalama Hata (Mean Error) ve Tahmin Hatasının Standart Sapması (RMSE) kullanılmıştır.

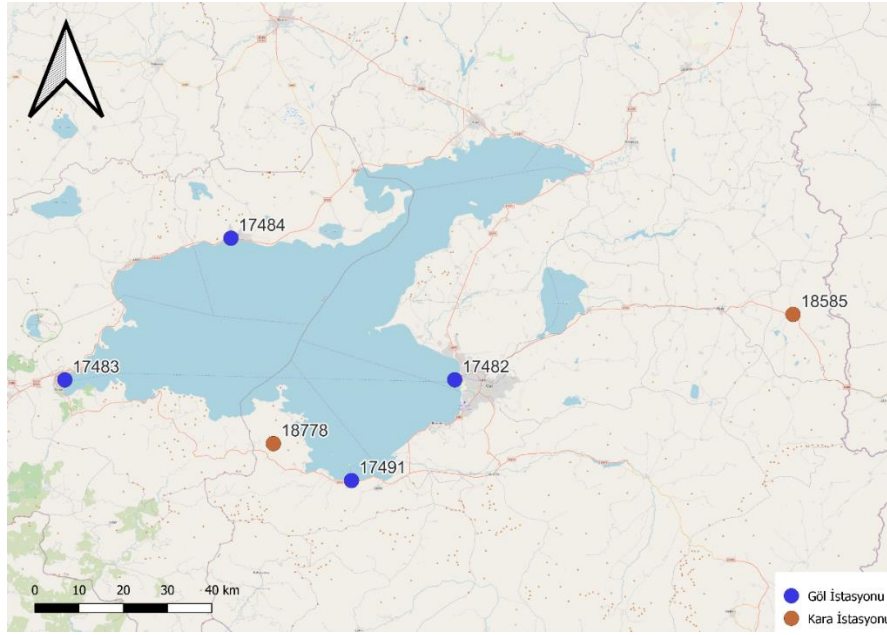
$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x \quad (2)$$

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

Ortalama hata ve tahmin hatasının standart sapması formülleri sırasıyla Eşitlik 2 ve Eşitlik 3’te verilmiştir. Bu eşitliklerde  $x_i$  model sonucunu,  $x$  gözlem değerini ve  $n$  ise gözlem sayısını temsil etmektedir.

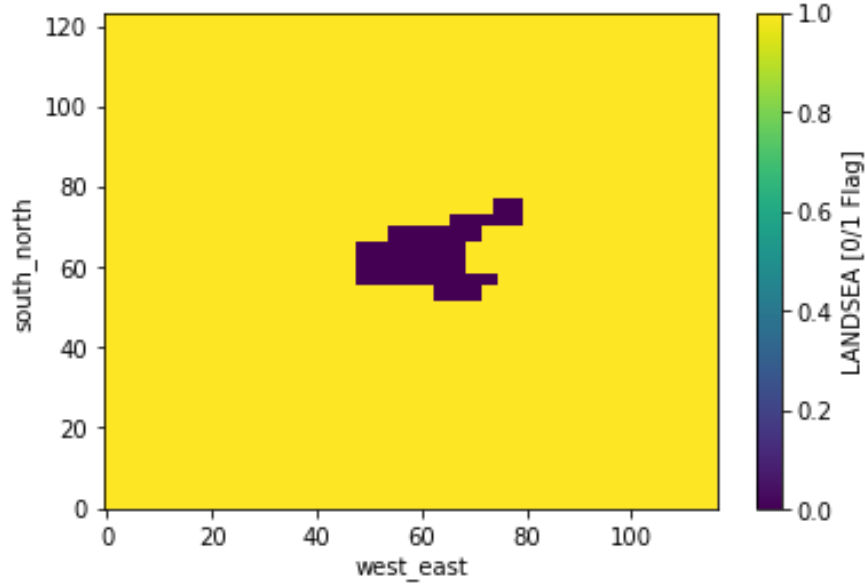
**Tablo 5.** Çalışmada kullanılan MGM istasyonlarının adları ve numaraları

İstasyon Kodu	İstasyon Adı	İstasyon Türü
18585	Van/Saray	Kara İstasyonu
18778	Gevaş/Aydınocak Köyü	Kara İstasyonu
17484	Adilcevaz Liman	Göl İstasyonu
17483	Tatvan Liman	Göl İstasyonu
17491	Gevaş Akdamar Feneri	Göl İstasyonu
17482	Van Liman	Göl İstasyonu

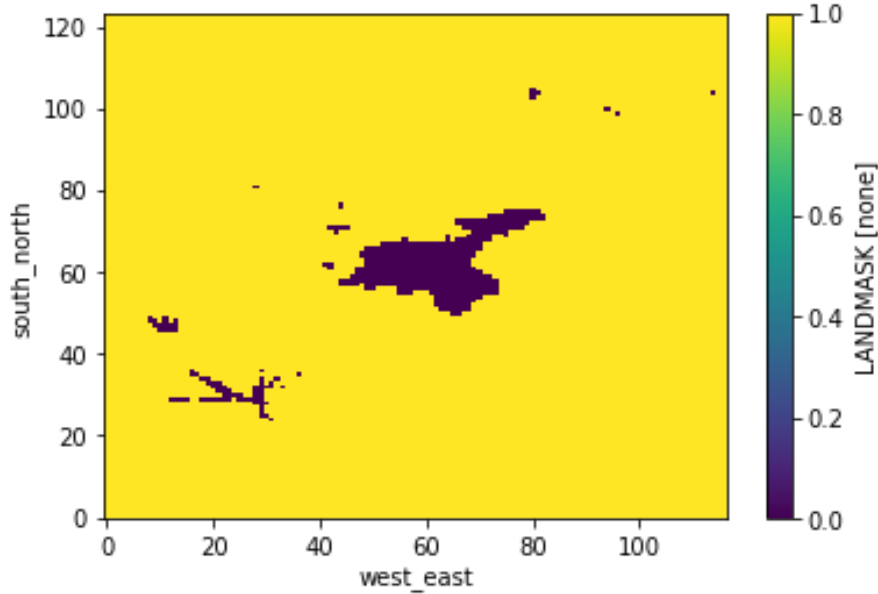

**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan MGM istasyonlarının alansal dağılımı

### İnterpolasyon Hatalarının Giderilmesi

Metgrid programı, meteorolojik değişkenlerin simülasyon alanına yatay olarak interpolate edilmesini sağlar. Bazı meteorolojik değişkenler, maskeli interpolasyon yapılmasını gerektirmektedir. Örneğin SST değişkeninde karanın maskelenmesi ve sadece su noktalarından alınan değerler ile interpolasyon yapılması gereklidir. Her bir meteorolojik değişken için metgrid interpolasyon seçeneklerinin bulunduğu "METGRID.TBL" dosyası, nadiren düzenlenmesi gereken bir dosya olmasına karşın, bu çalışmada Van Gölü yüzeyi sıcaklıklarının interpolasyonunda hatalar tespit edildiği için bazı düzenlemeler yapılmıştır. Bu hatalar, karada deniz yüzeyi sıcaklığı bulunması, SST değişkeninin gölün gerçek sınırlarının dışına taşması vb. hatalardır. Bu hatalar, Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü üzere ECMWF verisinde bulunan Van Gölü sınırlarının WPS programındaki sınırlar ile uyuşmamasından kaynaklanmaktadır. Sorunun çözümü için varsayılan SST interpolasyon yöntemleri olan "Sixteen-point overlapping parabolic interpolation" ve "Four-point bi-linear interpolation" yerine bu iki interpolasyon yönteminin çalışmadığı durumda metgrid programının başvurması için "Weighted four-point average interpolation", "Weighted sixteen-point average interpolation" ve "Breadth-first search interpolation" yöntemleri eklenmiştir. Ayrıca interpolasyon için kullanılacak SST değerlerinin ECMWF verisindeki gölün içinde bulunan noktalardan alınması ve WPS programındaki göl sınırları içerisine interpolate edilmesinin sağlanması adına, METGRID.TBL dosyasında ilgili kod satırları değiştirilmiştir.



Şekil 3. ECMWF verisindeki Van Gölü sınırları



Şekil 4. WPS programındaki Van Gölü sınırları

## BULGULAR

Alansal analizde sıcaklık, nem ve yağış değişkenleri incelenirken  $38^{\circ}$ - $39.5^{\circ}$  K enlemlerinin ve  $42^{\circ}$ - $44^{\circ}$  D boylamlarının sınırladığı bölgede alansal ortalama alınmıştır. Göl yüzeyi sıcaklığı değişkeni için de göl sınırları kapsamında alansal ortalama uygulanmıştır. Noktasal analiz için, istasyona en yakın grid noktasının değeri dikkate alınmıştır. Zaman serilerinde birbirine yakın değerler grafiklerin anlaşılabilirliğini düşürdüğü için, simülasyonların RMSE değerleri tablo olarak verilmiş olup, gerekli görülen yerlerde zaman serisi ve şekillere yer verilmiştir.

## Alansal Analiz

Sıcak ve soğuk dönem simülasyonları ERA5 veri setiyle alansal ortalama alınarak karşılaştırıldığında, R2 simülasyonunun her iki mevsimde de daha başarılı olduğu söylenebilir. Sıcak dönem RMSE değerlerine



bakıldığında (Tablo 6) simülasyonlar arasındaki hataların göl yüzeyi sıcaklığı haricinde birbirine yakın olduğu görülmektedir. Sıcak dönemde kesin bir üstünlük gösteren simülasyon çeşidi yoktur ancak soğuk dönem senaryosunda R2 simülasyonunun en düşük RMSE değerlerine sahip olması (Tablo 7), “sst\_update” yönteminin iyi sonuç verdiğini göstermektedir. İki senaryoda da simülasyonlar arasındaki en büyük farklar göl yüzeyi sıcaklığı değerlerinde görülmüştür. R2 simülasyonu 2 senaryoda da oldukça başarılıdır. Bu başarı, ERA5 verisi üretilirken ECMWF modellerinin kullanılıyor olması sebebiyle yanıltıcı olabilir. Çünkü R2 simülasyonunda göl yüzeyi sıcaklıkları ECMWF SST verisine göre güncelleneceğinden dolayı sonuçlar taraflı çıkabilir. Bu sebeple istasyonlar da kullanılarak noktasal analiz yapılmıştır.

**Tablo 6.** Sıcak periyot için ERA5 veri setine göre hata hesabı (RMSE)

Simülasyon/Değişken	Sıcaklık	Göl Yüzeyi Sıcaklığı	Bağıl Nem	Yağış
R1	2,254	3,092	6,230	0,196
R2	2,135	1,453	6,100	0,211
R3	2,266	3,154	5,908	0,213

**Tablo 7.** Soğuk periyot için ERA5 veri setine göre hata hesabı (RMSE)

Simülasyon/Değişken	Sıcaklık	Göl Yüzeyi Sıcaklığı	Bağıl Nem	Yağış
R1	2,811	2,376	12,002	1,351
R2	2,474	0,552	11,891	1,240
R3	2,940	3,309	11,908	1,320

### Noktasal Analiz

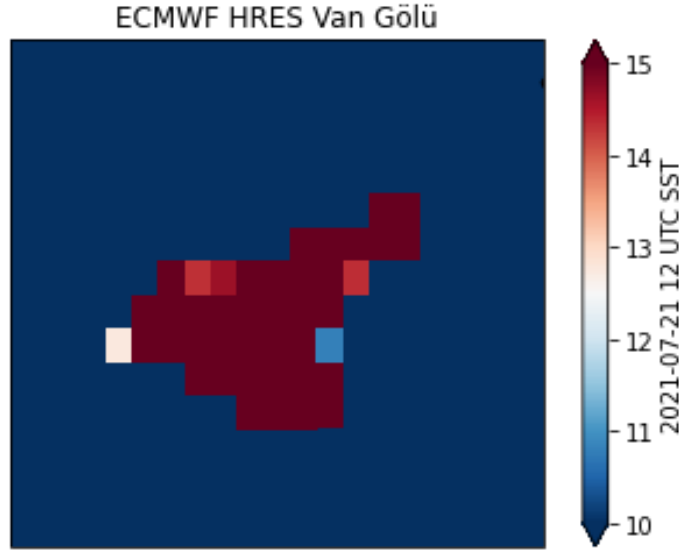
Model sonuçları istasyon verileriyle karşılaştırıldığında, mevsimlere göre doğruluk oranlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Sıcak periyot senaryosu (Tablo 8) sıcaklık değişkenindeki RMSE değerleri birbirine yakın olsa da, göl modülünün kullanıldığı R3 simülasyonunun daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bağıl nem ve yağış değişkenlerinde ise ilk 2 simülasyon türü daha başarılı olmuştur ve göl modülünün kullanıldığı simülasyon başarısızdır. Sıcak dönem senaryosu göl yüzeyi sıcaklıkları incelendiğinde en başarılı simülasyonun R1 simülasyonu olduğu görülmektedir.

**Tablo 8.** Sıcak periyot için MGM istasyonlarına göre hata hesabı (RMSE)

Simülasyon/Değişken	Sıcaklık		Göl Yüzeyi Sıcaklığı				Bağıl Nem		Yağış	
	İstasyon Numarası									
	18585	18778	17484	17483	17491	17482	18585	18778	18585	18778
R1	1,661	3,499	1,992	1,231	2,43	3,58	8,466	32,085	4,785	3,55
R2	1,687	3,535	6,671	17,903	2,468	14,88	8,611	30,882	4,356	4,023
R3	1,657	3,498	1,729	1,511	2,662	3,718	8,567	32,218	6,122	4,558

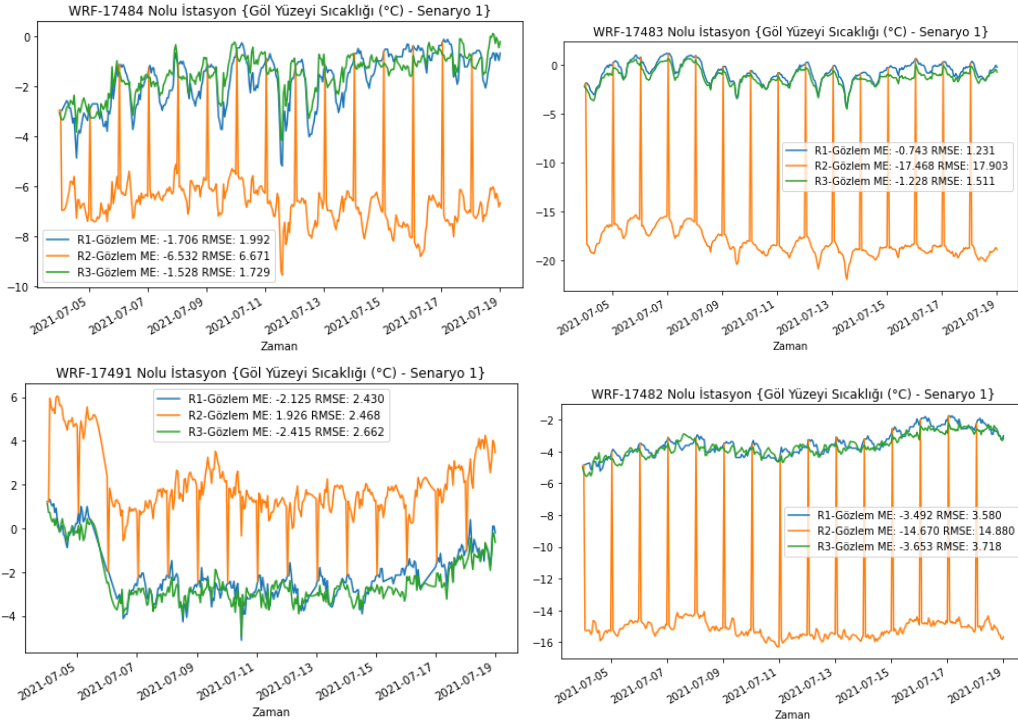
Dikkat çeken bir unsur ise, R2 simülasyonunda sıcak periyot senaryosunda gözlenen yüksek RMSE değerleridir. 17491 numaralı göl istasyonu hariç diğer göl istasyonlarında R2 simülasyonunun çok başarısız değerler tahmin ettiği görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda bu durumun ECMWF Tahmin verisinde bulunan tutarsızlıklardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Analiz verisinde Van Gölü yüzeyi sıcaklıkları doğru temsil edilse de Tahmin verisinde gölün kenarlarında olması gerekenden çok düşük sıcaklık değerleri bulunmaktadır. Şekil 5’te verilen 12 Temmuz günü 12 UTC ECMWF Tahmin ürününün göl yüzeyi sıcaklık alanı incelendiğinde, gölün kenarlarındaki soğuk grid noktalarını görmek mümkündür. Şekilde 20°C ve üzeri sıcaklıklar koyu kırmızı renkle

belirtilmiştir. Gölün kenarlarında sıcaklıkların  $8^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum diğer günlerde de devam etmektedir. Yani temmuz ayı için ECMWF Tahmin verisinde Van Gölü yüzeyi sıcaklıklarının iyi çözümlenmediği sonucuna varılır. Bu yüzden "sst\_update" yöntemi hatalı değerler üretmektedir. R1 simülasyonunda Analiz ürünündeki göl yüzeyi sıcaklığı sabit olarak alındığından dolayı, Tahmin verisindeki tutarsızlıklar sonuçlara etki etmemektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere, yalnızca Analiz ürünündeki göl yüzeyi sıcaklıkları tutarlı olduğundan dolayı, R2 simülasyonu her gün yalnızca bir kere doğru sıcaklık değerine yaklaşmaktadır. 17483 istasyonunda ortalama hata (mean error) değeri  $-17,468$  olan R2 simülasyonu, gerçek göl yüzeyi sıcaklığından günde yaklaşık  $17,5^{\circ}\text{C}$  uzaklaşmaktadır. Bu durum, ECMWF Tahmin verisinin temmuz ayında "sst\_update" yöntemi için uygun olmadığını göstermektedir.

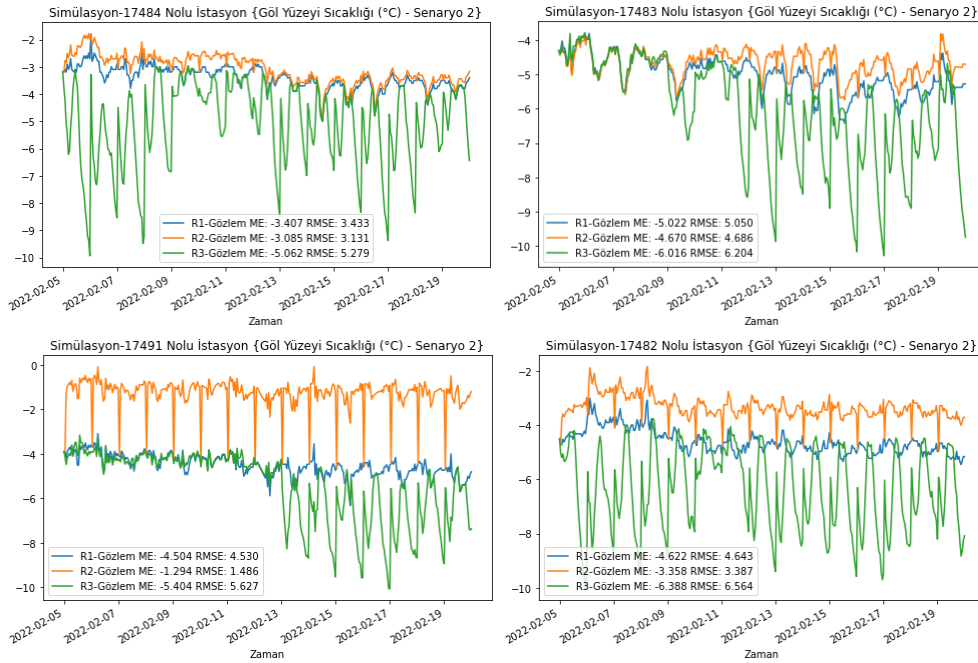


Şekil 5. Temmuz ayı ECMWF Tahmin verisindeki Van Gölü yüzeyi sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )

Soğuk periyotta en başarılı simülasyon R2 olmuştur (Tablo 9). Kış mevsiminde ECMWF Tahmin verisi Temmuz ayına kıyasla daha iyi çözümlenmektedir. Bu sebeple göl yüzeyi sıcaklıkları olağandışı değerler almamaktadır. Soğuk dönem senaryosunda "sst\_update" yöntemi en başarılı göl yüzeyi sıcaklığı değerlerini elde etmektedir. Göl modülünün soğuk dönemde göl yüzeyi sıcaklıklarını temsil etmede başarısız olduğu görülmektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, göl modeli normalden çok daha soğuk göl yüzeyi sıcaklıkları tahmin etmiştir.



Şekil 6. Model sonuçlarının senaryo 1 için göl yüzeyi istasyon sıcaklıklarıyla karşılaştırılması



Şekil 7. Model sonuçlarının senaryo 2 için göl yüzeyi istasyon sıcaklıklarıyla karşılaştırılması

**Tablo 9.** Soğuk periyot için MGM istasyonlarına göre hata hesabı (RMSE)

Simülasyon/ Değişken	Sıcaklık		Göl Yüzeyi Sıcaklığı				Bağıl Nem		Yağış	
	İstasyon Numarası									
	18585	18778	17484	17483	17491	17482	18585	18778	18585	18778
<b>R1</b>	2,759	4,732	3,433	5,050	4,530	4,643	12,976	21,827	0,947	2,184
<b>R2</b>	2,774	4,628	3,131	4,686	1,486	3,387	13,004	20,119	0,909	2,322
<b>R3</b>	2,754	4,762	5,279	6,204	5,627	6,564	12,967	23,097	0,929	2,128

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

WRF-Lake modülünün MGM'nin WRF simülasyonlarına sağlayabileceği olası katkının araştırılması için WRF 4.1.5 versiyonu kullanılarak, 15 günlük 2 farklı periyotta toplam 30 günlük simülasyon 3 farklı konfigürasyonla yapılmıştır. Simülasyonlarda model seçenekleri MGM operasyonel WRF simülasyonlarına uygun olarak seçilmiştir. Model sonuçlarının doğruluğunun alansal olarak teyit edilmesi için ERA5 yeniden analiz edilmiş veri seti, noktasal teyit için de MGM tarafından işletilen 2 adet kara ve 4 adet göl istasyonu kullanılmıştır. ECMWF HRES verisi ve WPS programındaki Van Gölü sınırlarının uyuşmaması sebebiyle “metgrid” interpolasyon seçenekleri değiştirilmiştir. Model sonuçları ERA5 yeniden analiz edilmiş veri setiyle karşılaştırıldığında, “sst\_update” olarak adlandırılan, göl yüzeyi sıcaklıklarının başlangıç ve sınır koşullarındaki SST verisine göre güncellendiği yöntemin ERA5 veri setine daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer değişkenlerde 3 simülasyonun da hata değerleri birbirine yakın olmasına karşın, göl yüzeyi sıcaklıklarında R2 simülasyonunun başarısı daha belirgindir. Ancak, ERA5 verisi üretilirken ECMWF model verileri de kullanıldığından dolayı, sonuçlarda taraflılık olması beklenebilir. Bu sebeple MGM istasyonları kullanılarak noktasal analize başvurulmuştur. Sıcak periyot senaryosunda ECMWF göl yüzeyi sıcaklığının iyi çözümlenmemesi sebebiyle R2 simülasyonunda hata değerlerinin çok yüksek çıktığı görülmüştür. Verideki tutarsızlıklar çözülmediği sürece R2 konfigürasyonu ile model başarısız olacaktır. Bu sorunun çözümü için, WRF modeli haricinde uygulanacak bir interpolasyon şeması kullanarak ECMWF verisindeki gölün kenarlarındaki hatalı SST değerlerinin düzeltilmesi hedeflenebilir. Bir diğer seçenek ise “metgrid” interpolasyon seçeneklerinin değiştirilmesidir ancak ECMWF verisindeki göl sınırlarının WPS programındaki sınırlarla uyuşmaması, kullanılabilir interpolasyon seçeneklerini kısıtlamaktadır. Bu çalışmada yapılan denemeler sonucunda belirlenen en uygun metgrid interpolasyon seçenekleri kullanılmıştır. Eğer ECMWF verisindeki problemler çözülemiyorsa, bu çalışmanın bulguları incelendiğinde; modelin “sst\_update” yöntemi kapalıyken çalıştırılması veya göl modülünün kullanılmasının, daha başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlayacağı görülmektedir. Son bir seçenek ise WRF modelinde bulunan “avg\_tsfc.exe” programının kullanılması olabilir. Bu program, göller model verisinde hiç yoksa veya yeterince iyi çözümlenmemişse, hava sıcaklığı alanını kullanarak göl için yüzey sıcaklığı elde etmektedir. Sıcaklık alanı sürekli bir değişken olduğu için gölün kenarlarında tutarsız değerler bulunmayacaktır. Bu sayede sıcaklık alanından elde edilen göl yüzeyi sıcaklıkları, ECMWF verisinde bulunan tutarsız Van Gölü yüzeyi sıcaklıklarına bir alternatif olabilir. Soğuk dönem senaryosunda en başarılı simülasyonun R2 olduğu görülmüştür. Göl yüzeyi sıcaklıklarında tüm istasyonlarda en başarılı sonuçlar bu simülasyonda elde edilmiştir. Bu durum da yaz mevsiminde ECMWF verisinde olan tutarsızlıkların kış mevsiminde görülmediğini göstermektedir. Göl modeli kış mevsiminde gerçek değerlerden çok düşük sıcaklık değerleri tahmin etmektedir. Bu durum, kış mevsiminde Van Gölü için göl modelinin kalibrasyonunun yeterli olmadığını göstermektedir. Literatürde de bahsedildiği üzere göl modelinin 50 metre ve daha derin göllerde hatalı türbülanslı karışım hesaplamaları yapabildiği görülmektedir. Van Gölü de bu kategoriye girdiği için eddy difüzivitesi katsayılarının parametrisasyonu ile daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bu kalibrasyonun yapılması için gölün farklı derinliklerinde ölçülmüş sıcaklık profilleri gereklidir. Ayrıca göl yüzeyindeki radyasyon dengesinin hatalı hesaplanması, absorpsiyon katsayılarının uygun olmaması vb. sebepler de göl modelinin başarısızlığına yol açmış olabilir. Aynı zamanda gölün kirlilik durumu vb. özellikler göl yüzeyinin albedosunun ve pürüzlülük katsayılarının değişmesine sebep olacaktır, bu yüzden bu değerlerin sabit alınması model sonuçlarını gerçek değerlerden

uzaklaştıracaktır. WRF modelinin konfigürasyonunda kullanılan “namelist.input” dosyasında, göl modelinin parametrisasyonu için yeterli sayıda seçenek bulunmamaktadır. Bu yüzden gelecekteki çalışmalarda göl modelinin kodu düzenlenerek Türkiye için parametrisasyon çalışmaları yapılmalıdır. Şu anki durumuyla göl modeli, yaz döneminde kullanılması için uygundur ancak kış mevsiminde MGM operasyonel simülasyonlarına katkı sağlamayacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde HPCF (High Performance Computing Facility) sistemi kullanılan ECMWF'e (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) teşekkürlerimizi sunarız. Şekil 2'de kullanılan harita verileri, OpenStreetMap'e katkıda bulunanlar tarafından telif hakkına sahiptir ve <https://www.openstreetmap.org> adresinden temin edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Gu, H., Jin, J., Wu, Y., Ek, M. B. ve Subin, Z. M. (2015). Calibration and validation of lake surface temperature simulations with the coupled WRF-lake model. *Climatic Change*, 129(3–4), 471–483. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0978-y>
- Guo, S., Wang, F., Zhu, D., Ni, G. ve Chen, Y. (2022). Evaluation of the WRF-Lake Model in the Large Dimictic Reservoir: Comparisons with Field Data and Another Water Temperature Model. *Journal of Hydrometeorology*, 23(8), 1227–1244. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0220.1>
- Hoşgören, M. (1994). Türkiye'nin Gölleri. *Türk Coğrafya Dergisi*, 29, 19–51.
- Hostetler, S. W. ve Bartlein, P. J. (1990). Simulation of lake evaporation with application to modeling lake level variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resources Research*, 26(10), 2603–2612. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02603>
- Ma, Y., Yang, Y., Qiu, C. ve Wang, C. (2019). Evaluation of the WRF-Lake Model over Two Major Freshwater Lakes in China. *Journal of Meteorological Research*, 33(2), 219–235. <https://doi.org/10.1007/s13351-019-8070-9>
- Oleson, K. W., Lead, D. M. L., Bonan, G. B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C. D., Levis, S., Li, F., Riley, W. J., Subin, Z. M., Swenson, S. C., Thornton, P. E., Bozbiyik, A., Fisher, R., Heald, C. L., Kluzek, E., Lamarque, J.-F., Lawrence, P. J., Leung, L. R., ... Yang, Z.-L. (2013). Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM). <https://doi.org/10.5065/D6RR1W7M>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., & Huang, X.-Y. (2021). A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. <https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97>
- Subin, Z. M., Riley, W. J. ve Mironov, D. (2012). An improved lake model for climate simulations: Model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 4(1). <https://doi.org/10.1029/2011MS000072>
- Van İl Kültür Ve Turizm Müdürlüğü. (t.y.). Van Gölü. <https://van.ktb.gov.tr/TR-88276/van-golu.html> adresinden alındı.
- Wu, Y., Huang, A., Lazhu, Yang, X., Qiu, B., Wen, L., Zhang, Z., Fu, Z., Zhu, X., Zhang, X., Cai, S. ve Tang, Y. (2020). Improvements of the coupled WRF-Lake model over Lake Nam Co, Central Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 55(9–10), 2703–2724. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05402-3>
- Xiao, C., Lofgren, B. M., Wang, J. ve Chu, P. Y. (2016). Improving the lake scheme within a coupled WRF-lake model in the Laurentian Great Lakes. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(4), 1969–1985. <https://doi.org/10.1002/2016MS000717>
- Xu, L., Liu, H., Du, Q. ve Wang, L. (2016). Evaluation of the WRF-lake model over a highland freshwater lake in southwest China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(23). <https://doi.org/10.1002/2016JD025396>



# İSTANBUL VE ANKARA'NIN SICAKLIK KAYITLARINDAKİ KENTSEL ETKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: BİREYSEL OLARAK METROPOLLER KENTSELLEŞMEYE YANITTA NASIL FARKLILIK GÖSTEREBİLİR?

**Kutay Dönmez, Berkay Dönmez, Cemre Yürük Sonuç, Yurdanur Ünal**

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü  
donmezk16@itu.edu.tr, donmezb16@itu.edu.tr, yurukc@itu.edu.tr, sunal@itu.edu.tr

## Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin stratejik metropolleri olan İstanbul ve Ankara'nın kentsel ve kırsal bölgelerindeki sıcaklık değişkenliğini, 2011-2018 dönemini kapsayan periyot için uydu, yer gözlemleri ve Avrupa Orta Vadeli Hava Tahmin Merkezi (ECMWF) reanaliz verilerini kullanarak incelemektedir. Bu çalışmanın uygulaması iki temel bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak, istasyon gözlemlerinden sağlanan saatlik 2 metre ortalama sıcaklık verileri kullanılarak kentsel ve kırsal istasyonların yıllık, mevsimsel ve aylık sıcaklık özelliklerindeki farklılıklar şehir özelinde analiz edilmiştir. İkinci olarak, GHS Yerleşim Modeli 1 km çözünürlüğünde veri seti kullanılarak kentsel ve kırsal grid noktaları belirlenmiş ve MODIS-Terra günlük yüzey sıcaklık verileriyle kentsel ve kırsal grid noktaları arasındaki uzun vadeli farklılıkları ortaya konmuştur. Ayrıca, grid tabanlı analizde, her şehirde kentsel ve kırsal alanlarda günlük maksimum sıcaklığın belirli bir eşiği aşan gün sayısını karşılaştırmak için yüksek çözünürlüklü CHIRTS-günlük sıcaklık ürünü kullanılmıştır. Sonuçlar, kentsel ısı adası (UHI) etkisi olarak adlandırılan kentsel ve kırsal alanlar arasındaki sıcaklık farkı değişkenliği incelenmiştir. Ancak, bu değişkenlik, kentsel alanların toplam çalışma alanının yaklaşık %20'sini oluşturduğu İstanbul için kentsel alanların %4'ten daha az olduğu Ankara'ya göre çok daha yüksek tespit edilmiştir. İstanbul'daki kentsel kullanımı dikkate aldığımızda, gözlemlenen sıcaklık değerlerinin, olasılık dağılım fonksiyonunun (PDF) daha sıcak bir tarafına kaydığına dair net bir sinyal bulunmakta ve bu durum kernel yoğunluk kestirimi analizi ile ortaya konmaktadır. Ancak, Ankara için karşılık gelen PDF analizinde dikkate değer bir değişiklik görülmektedir. Uzun vadeli UHI analizleri de bu bulguları desteklemekte olup, İstanbul'un kentsel ve kırsal konumları arasındaki yıllık, mevsimsel ve aylık sıcaklık farkı, Ankara'ya kıyasla daha belirgindir. Bu çalışma, farklı şehirlerde kentsel etkinin geniş bir genelleştirmesinden kaçınmanın önemini aktarmaktadır.

*Anahtar kelimeler: Kentsel Isı Adası, Kentleşme, Sıcaklık, Uzaktan Algılama, Arazi Örtüsü*

## ASSESSMENT OF THE URBAN IMPACT ON THE TEMPERATURE RECORDS OF ISTANBUL AND ANKARA: HOW CAN INDIVIDUAL METROPOLES DIFFER IN RESPOND TO URBANIZATION?

### Abstract

This study examines the temperature variability over urban and rural sites of Istanbul and Ankara, two strategic metropolises in Turkey, using multiple data sources, including satellite, ground observations, and a reanalysis product for the period of 2011-2018. The practice of this study is twi-formed. Firstly, we introduce a location-based analysis, in which we identify the differences in annual, seasonal, and monthly temperature characteristics of urban and rural stations using hourly 2-meter mean temperature provided from station observation data. Secondly, in the grid-based analysis, we utilize the GHS Settlement Model grid classification dataset with a resolution of 1 km to determine urban-rural grids and employ the MODIS-Terra daily land surface temperature data to reveal the long-term dissimilarity of the urban and rural grids. Also included in the grid-based analysis is the CHIRTS-daily temperature product at high resolution, which we use to compare the number of days where the daily maximum temperature exceeds a specified threshold at urban and rural grids in each city. Results reveal the variability of the temperature difference between the corresponding urban and rural grids, which we refer to as the urban heat island (UHI) effect. However, this variability is higher for Istanbul, where urban land use constitutes approximately 20% of the grids, compared to Ankara, where the percentage of the grids represented by urbanization is less than 4%. When we consider the urban land use in Istanbul, there is a clear signal of a shift in the location parameter of observed temperature values to the warmer side of the probability distribution function (PDF), as revealed by the kernel density estimation analysis. Yet, for Ankara, we do not see a notable change in the corresponding PDF. Long-term UHI analyses also support these, as the difference in annual, seasonal, and monthly temperature between urban and rural locations of Istanbul is more pronounced than in Ankara. This study communicates the importance of avoiding a broad generalization of the urban impact in different cities.

*Keywords: Urban Heat Island, Urbanization, Heat, Remote Sensing, Land Cover*

**Sorumlu Yazar:** Kutay Dönmez

**Geliş Tarihi:** 1 Mayıs 2024

**Kabul Tarihi:** 22 Haziran 2024

**Yayın Tarihi:** 3 Temmuz 2024

**Atıf Şekli:** Dönmez, K., Dönmez, B., Sonuç, C.Y., Ünal, Y. (2024). İstanbul ve Ankara'nın Sıcaklık Kayıtlarındaki Kentsel Etkinin Değerlendirilmesi: Bireysel Olarak Metropoller Kentselleşmeye Yanıtta Nasıl Farklılık Gösterebilir?, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 39-48.

**Makale Tipi:** Araştırma Makalesi

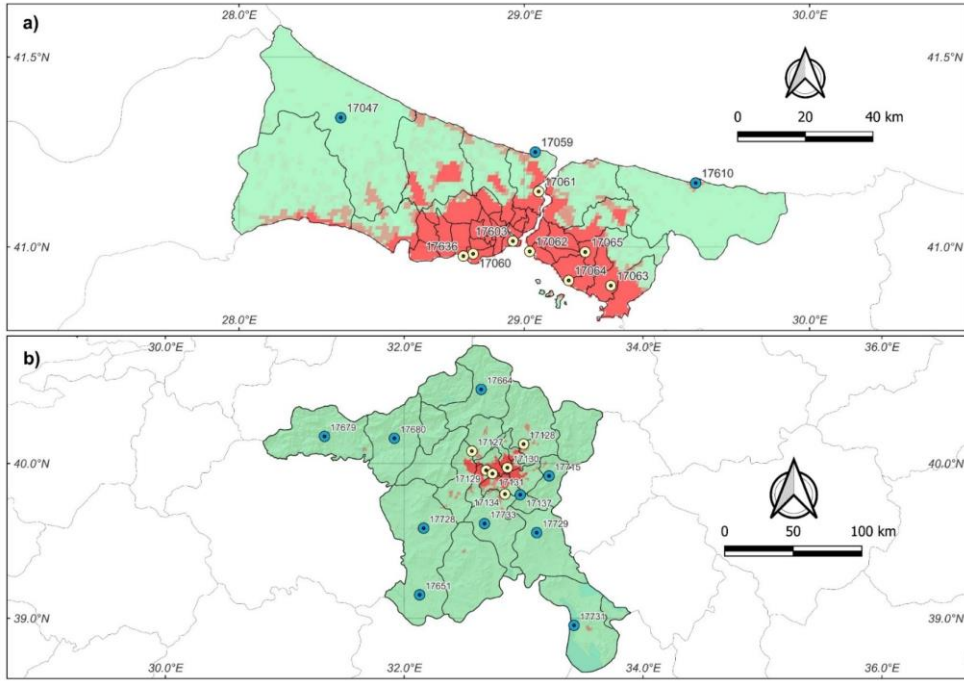
**e-ISSN:** 3023-8560

## GİRİŞ

İnsan katkısı nedeniyle son yüzyıl içerisindeki iklim değişikliğindeki hızlanma nedeniyle, birçok ülkede sıcaklık aşırılıklarının yoğunluğu ve frekansı artmaktadır (Perkins vd., 2012). Bu aşırılıklar, kentsel yayılmanın genişlemesi ile birleştiğinde, kentleşmiş alanlarda yaşayan nüfusu yüksek sıcaklıkların etkilerine karşı daha savunmasız bırakmaktadır (Chapman vd., 2017; Liao vd., 2018). Termodinamik olarak, antropojenik ısı emisyonlarının ve geçirimsiz yüzey alanlarının artması, kentsel alanlardaki sıcaklıkların kentin çevresinde yer alan kırsal alanlara göre daha yüksek olmasına neden olmaktadır (Doan vd., 2016), bu da kentsel ısı adası (UHI) fenomenini doğurmaktadır. UHI'nin büyüklüğü günlük ve mevsimsel olarak değişebilir ve farklı şehirlerde şehrin enlemi, topoğrafyası veya şehrin geometrisine bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Sonuç olarak, küresel iklim değişimine bağlı sıcak hava dalgalarının sıklaşması ve şiddetlenmesiyle kentleşmenin yarattığı UHI etkisinin birleşimi, kentsel alanlarda sıcak hava dalgalarının çok daha şiddetli hissedilmesine neden olurken, çevresindeki kırsal alanlara göre kentsel alanlarda daha fazla ölüme yol açmaktadır (Gabriel ve Endlicher, 2011).

Termodinamik etkilerin yanı sıra, kentleşmenin artması ayrıca kentsel alanın çevresindeki mikro iklim dinamiklerini de değiştirmektedir (Li vd., 2020; Niyogi vd., 2020). Kent morfolojisi rüzgarların yönünü değiştirebilir, havanın yukarı doğru hareketi teşvik edilebilir veya hatta yağış sistemlerinin özelliklerini etkileyebilir. Şehir geometrisine bağlı pürüzlülük elemanları ve şehrin yaydığı antropojenik ısı, şehrin bulunduğu topografyaya, kara-deniz dağılımına ve hava sistemlerinin özelliklerine bağlı olarak yağışların şiddetini etkilerken yağış merkezinin kentsel alanın rüzgâr üstü yönünde veya rüzgâr altı yönünde oluşmasını sağlayabilmektedir (Shimadera vd., 2015). Yani kentleşmenin termodinamik ve dinamik etkileri uyum içinde şekillenir. Örneğin, kentleşmeye bağlı olarak rüzgâr alanının zayıflaması (Zhang vd., 2022), kent üzerindeki sıcaklıkların kırsal alana göre daha yüksek olmasını sağlar (Ünal vd., 2020). Bu nedenle, insan yaşamını ve şehirlerin çevresindeki altyapıyı olumsuz etkileyebileceği göz önüne alındığında, UHI'nin büyüklüğünün ve zamansal fizyolojisinin analiz edilmesi kritiktir.

Türkiye'nin nüfusunun en fazla olduğu iki şehri olan İstanbul ve Ankara'da UHI'nin eğilimini ve mevsimselliğini ortaya çıkarmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Geçmişteki araştırmalar, Ankara'daki kentsel arazi örtüsünün hava sıcaklığı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu öne sürerken (Karaca vd., 1995), son dönem araştırmalar özellikle şehrin sıcak mevsimlerinde UHI etkisine vurgu yapmaktadır (Cicek, 2005; Turkoglu, 2009). Benzer şekilde, İstanbul'da UHI etkisi ilkbahar ve yaz aylarında daha belirgin hale gelmektedir (Ünal vd., 2020). Literatürde birkaç çalışma dışında (Basar vd., 2008; Dikhan vd., 2015; Zaeemdar ve Baycan, 2017; Khorrani ve Gunduz, 2020), İstanbul ve Ankara'da yüksek çözünürlüklü yeniden analiz ve uydu verileri kullanılarak UHI'nin değerlendirilmesini sağlayan çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, bu şehirlerdeki UHI üzerine yapılan çoğu araştırma, yalnızca nokta farklarını değil, grid tabanlı veri setleri tarafından sağlanan mekansal ortalama farklarını göz önünde bulundurarak kentsel ve kırsal alanlar arasındaki UHI büyüklüğünün belirlenmesine odaklanmıştır. Bu çalışma, uydu verileri, yer gözlemleri ve yeniden analiz verilerinin bir kombinasyonunu kullanarak 2011-2018 yılları arasındaki İstanbul ve Ankara'nın kentsel ve kırsal bölgelerindeki sıcaklık değişkenliğini inceleyerek ve karşılaştırarak, literatürdeki bu eksikliği doldurmayı hedeflemektedir.



**Şekil 1.** İstanbul'un (a) ve Ankara'nın (b) coğrafi konumları ile analizde kullanılan yer gözlem istasyonlarının gösterildiği haritalar. Mavi (Sarı) renklerle işaretlenmiş gözlem noktaları kırsal (şehir) istasyonlara karşılık gelir. Yeşil tonlar kırsal ızgaraları, kırmızı tonlar ise İstanbul'daki kentsel ızgaraları temsil eder.

## VERİ VE YÖNTEMLER

### Veriler

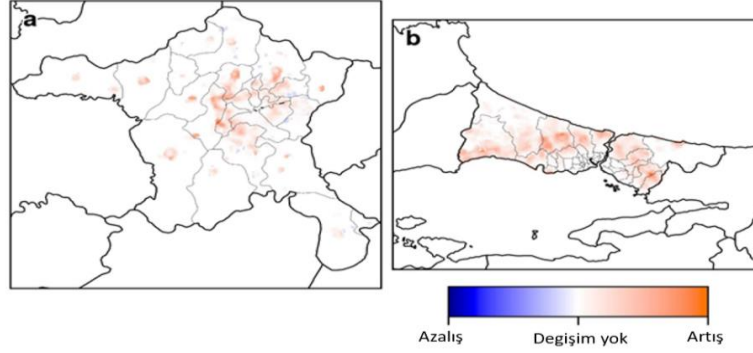
Bu çalışmada, 2011-2018 yılları arasındaki sekiz yıllık bir zaman aralığı için kentsel ve kırsal alanlardaki arazi yüzeyi ve hava sıcaklığı değişimlerini analiz etmek için yer gözlem istasyonları ve uydu gözlemleri kullanılmıştır. Çalışma alanları üzerinde kullanılan veriler, NASA'nın TERRA uydusu Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektro-radyometre (MODIS) algılayıcısı ile gözlenen, yatay çözünürlüğü 1 km olan gündüz sıcaklık gözlemleri (Wan vd., 2015) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hava gözlem istasyonlarında ölçülen 2 m hava sıcaklığı verileridir. Gözlem istasyonlarının konumları Şekil 1'de gösterilmektedir. Çalışmada tamamlayıcı bir veri seti olarak, ERA5 reanaliz verilerinin yanlılığının azaltılması ve bilinear interpolasyon ile yüksek çözünürlüğe getirilmesi sonucu elde edilen CHIRTS günlük maksimum sıcaklık verisi de kullanılmıştır (Verdin vd., 2020). Dahası, kentsel ve kırsal konumlarımızın tanımı, grid tabanlı ve nokta tabanlı veriler için farklıdır. Yani, kentsel ve kırsal alanların sınıflandırmaları yapılırken, yalnızca GHS Yerleşim Modeli 2015 (GHS-SMOD) (Pesaresi vd., 2019) arazi örtüsü ürünü kullanılmıştır, bu da seçilen zaman aralığıyla uyumlu olarak, MODIS-Günlük verileriyle yapılan analiz için (Şekil 1'de kırmızı ve yeşil ile gösterilen alanlar), seçilen şehirler için arazi kullanım haritalarının mevcut literatür ve görsel incelemesi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

### Çalışma Alanı

İstanbul ve Ankara, Türkiye'nin en kalabalık şehirlerinden ikisidir ve yaklaşık olarak sırasıyla %22 ve %4 kentsel arazi örtüsü yüzdesine sahiptir. Yüzde farkı büyük olsa da kentsel olarak sınıflandırılan grid sayısı karşılaştırılabilir düzeydedir. Bu şehirlerin kentsel özellikleri, kent nüfusunun zaman içindeki artışına bağlı olarak özellikle doğu-batı yönlerinde orijinal kent merkezinin çeperlerinde genişlemiştir. Nitekim Şekil 2'den de görüldüğü gibi, 1992 ve 2013 yılları arasındaki gözlemler kullanılarak hesaplanan şehir sakinlerinin gece ışık kullanımlarındaki belirgin artış, şehirleşmenin zaman içerisindeki yayılımını göstermektedir. İstanbul'da, 1990'da yaklaşık %55'in üzerinde olan orman arazi örtüsünde dramatik bir azalma yaşanmış ve bu alanların büyük bir kısmının kentsel arazi örtüsüne dönüşmüştür. Öte yandan, Ankara'daki kentsel genişlemenin yukarı yönlü eğilimi hem orman hem de tarım arazi örtüsünde bir azalmanın sonucudur.

### Sıcaklık Değişim Analizi Metodolojisi

Burada, kentleşmiş ve kırsal olarak belirlenen konumlar arasındaki sıcaklık farkındaki uzun vadeli değişkenlikleri incelenmektedir. Bu sıcaklık farkı aynı zamanda kentsel ısı adası (UHI) olarak da adlandırılabilir. Temel olarak izlenen strateji, MODIS-Günlük ve yer istasyonu verileriyle hesaplanan günlük ve saatlik UHI değerlerini aylık, mevsimsel ve yıllık zaman ölçeklerinde incelemektir. Ancak, grid tabanlı ve nokta tabanlı verilerle UHI hesaplamak için farklı metodolojiler geliştirmek gerekmektedir. Bu amaçla, öncelikle, GHS-SMOD verileri yalnızca kentsel ve kırsal gridleri içerecek şekilde yeniden sınıflandırılır ve MODIS-Günlük arazi yüzeyi sıcaklık verileri alınan arazi örtüsü verisinin gridleriyle eşleşecek şekilde yeniden örüntülenir. İkinci olarak, her zaman adımında kentsel ve kırsal grid sınıflandırmaları arasındaki arazi yüzeyi sıcaklık değerlerinin ortalamaları hesaplanır. Ardından, nokta tabanlı veriler için, her yer istasyonu konumu için uygun arazi kullanım etiketleri (kentsel veya kırsal) belirlenir ve saatlik 2-metre sıcaklık zaman serisi için benzer bir ortalama hesaplaması yapılır. Son olarak, uzun vadeli ortalamaları elde etmeden önce, ortalama kırsal değerlerin ortalama kentsel değerlerden çıkarılmasıyla UHI büyüklükleri tespit edilir. Buna ek olarak, sıcaklık değerlerinin olasılık dağılım fonksiyonu (PDF) kentsel ve kırsal grdilerde bağımsız olarak hesaplanır ve kentsel arazi kullanım özelliklerinin herhangi bir değişikliğe neden olup olmadığı, konum, yayılma veya şekil parametrelerindeki değişimlerle incelenir.

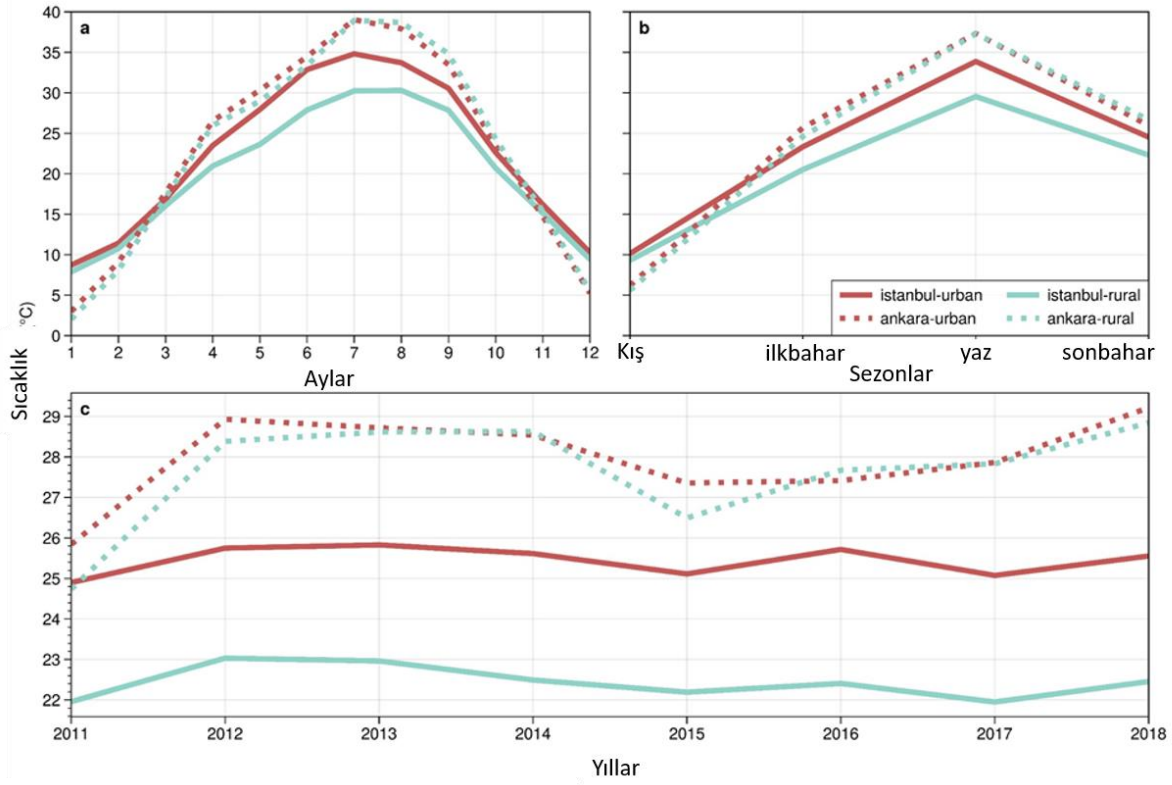


Şekil 2. Ankara'da (a) ve İstanbul'da (b) 1992 ile 2013 arasındaki gece zamanı ışık kullanımındaki değişiklikler

### İSTANBUL VE ANKARA İÇİN UHI DEĞİŞİMLERİ

MODIS-Günlük gözlem verilerinin analizine göre kentleşmenin arazi yüzeyi sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu ve bu etkinin İstanbul ve Ankara için bölgesel özelliklerine bakılmaksızın belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmektedir (Şekil 3). Açıkça görülmektedir ki, İstanbul'un kentleşmiş ve kırsal konumları arasındaki sıcaklık farkındaki uzun vadeli değişkenlik, Ankara'ya göre daha yüksektir. Kentsel ısı adası (UHI) büyüklüğü olarak adlandırdığımız bu sıcaklık farkı, aylık, mevsimsel ve yıllık değişimler gösterirken, bu uzun vadeli analizlerde İstanbul'da bu fark, Ankara'ya kıyasla en az 2,0°C daha büyüktür. Bu sıcaklık farkı, arazi yüzeyi sıcaklıklarının aylık incelemesinde 4,0°C'ye kadar çıkmaktadır. Ayrıca, sonuçlarımız, UHI'nin İstanbul'da yaz aylarında ve Ankara'da ilkbaharda daha belirgin hale geldiğini göstermektedir, bu da önceki çalışmaların bulgularını desteklemektedir (Turkoglu, 2009; Ünal vd., 2020, Berkay vd., 2021; Kutay vd., 2021). Şekil 4, yer gözlemlerinden alınan 2 metrelik hava sıcaklığını kullanarak benzer bir analiz sunmaktadır ve kentleşmiş konumların sıcaklık değerlerindeki belirgin artış, yukarıdaki sonuçlarla paralellik göstermektedir. Ancak, hava sıcaklığı yerine arazi yüzeyi sıcaklığı kullanıldığında sıcaklık farkının aralığı daralmaktadır çünkü kentsel yüzeylerin termodinamik özellikleri daha fazla ısınmayı desteklemektedir. Ayrıca, her şehirde kentsel ve kırsal istasyonlar arasındaki hava sıcaklığı farkının mevsimsel deseni, arazi yüzeyi sıcaklığı ile yapılan analizle benzerdir.

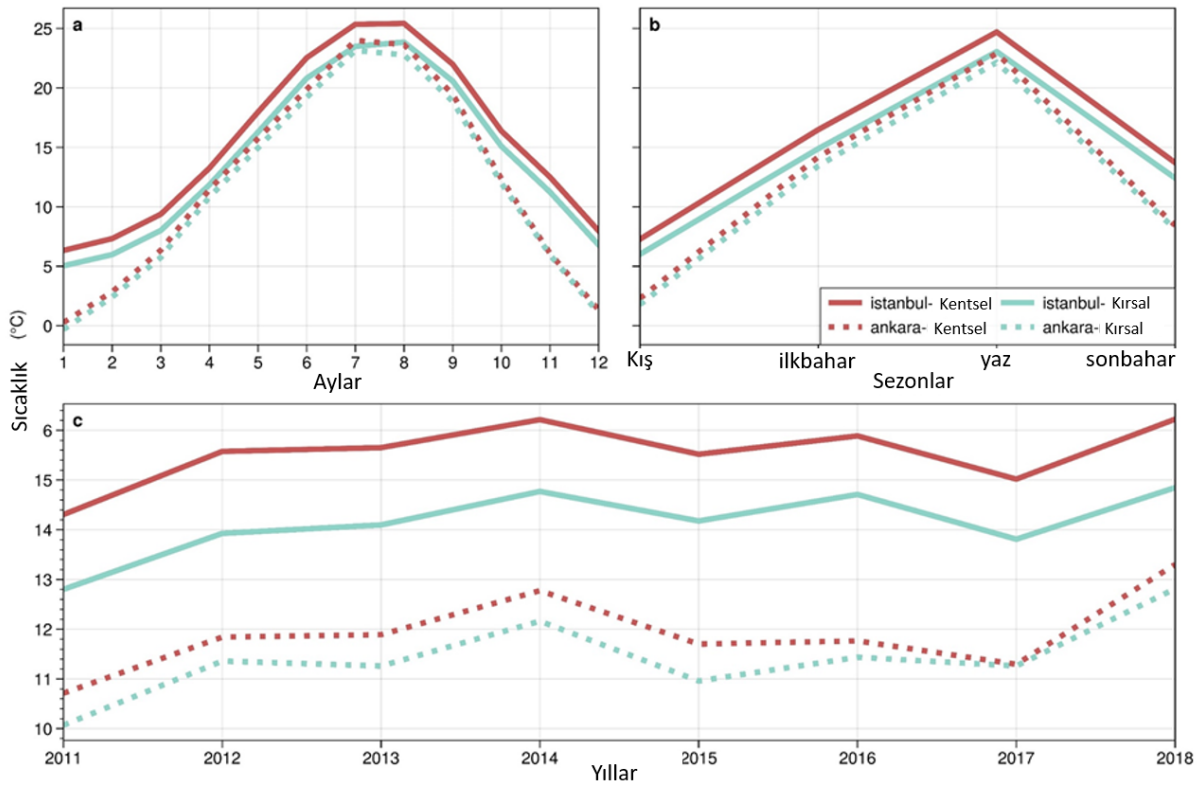




**Şekil 3.** İstanbul ve Ankara için GHS-SMOD arazi örtüsü verisi tarafından sağlanan kentsel ve kırsal ızgaralar için MODIS tabanlı aylık (a), mevsimsel (b) ve yıllık (c) ortalama arazi yüzeyi sıcaklık değerleri

Çeşitli çalışmalar, kentsel arazi örtüsü ve kentleşme ile ilgili süreçlerin etkisiyle meteorolojik ve hidrometeorolojik değişkenlerin dağılımlarının istatistiksel parametrelerinin değişiklik gösterdiğini belirtmektedir (Lu vd., 2017; Argueso vd., 2013; Liao vd., 2018; Lu vd., 2019). Benzer şekilde, bu çalışmada MODIS-Günlük ve yer gözlem verileri kullanılarak, kentsel ve kırsal sınıflandırmalar için hava ve arazi yüzeyi sıcaklık dağılımları incelenmiş, kentsel ve kırsal konumlar üzerinde olası sıcaklık değerlerinin değişim aralığı tespit edilmiştir. Şekil 5 ve 6, 2-metre hava sıcaklığı ve arazi yüzeyi sıcaklığı değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını her iki şehir için göstermektedir. Şekillerden çıkan en çarpıcı sonuç, kentsel arazi örtüsünün sıcaklık aralığını ve konum parametresini her iki şehir için de dağılımın daha sıcak tarafına kaydırmasıdır. İstanbul'da, dağılımdaki en yüksek olasılıkla olan arazi yüzeyi sıcaklık değerleri kent üzerinde 5°C kadar daha sıcak olmaktadır. Ancak, İstanbul ve Ankara'nın 2-metre hava sıcaklığına karşılık gelen kayma o kadar dikkat çekici değildir. İlginç bir şekilde, konum parametresinin yanı sıra, dağılımın şekil parametresi üzerindeki kentleşmenin etkisi özellikle Ankara'nın sıcaklık dağılımında vurgulamaktadır (Şekil 5b). Bu sonuçlar, kentleşmenin sadece kırsal bölgelere kıyasla daha yüksek sıcaklıkları teşvik etmekte kalmayıp aynı zamanda ilgili şehirlerin kentlerin sınırları boyunca da mümkün olan sıcaklık değerlerinin aralığını değiştirdiğini öne sürmektedir.



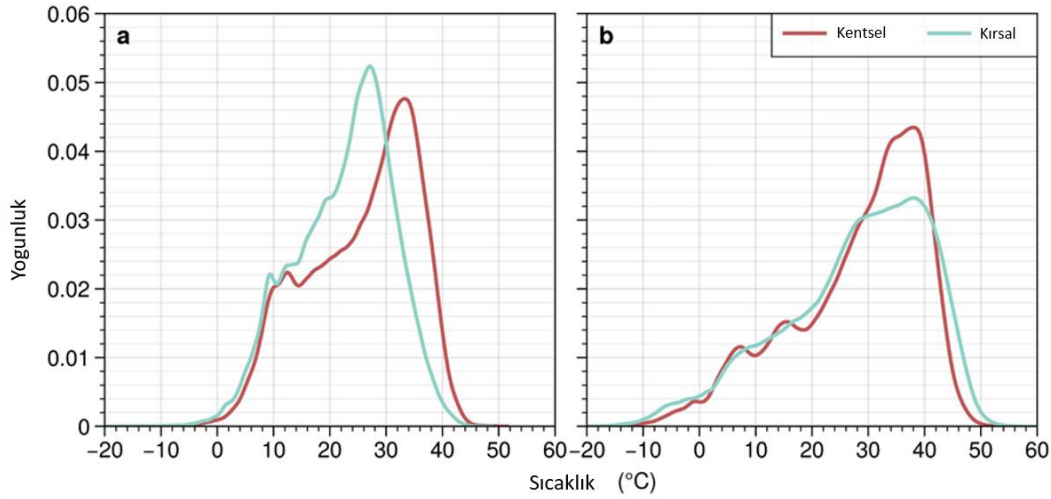


Şekil 4. GHS-SMOD arazi örtüsü verisi kullanılarak hesaplanan kentsel ve kırsal alanlar için yer gözlem tabanlı aylık (a), mevsimsel (b) ve yıllık (c) ortalama 2 metre hava sıcaklık değerleri

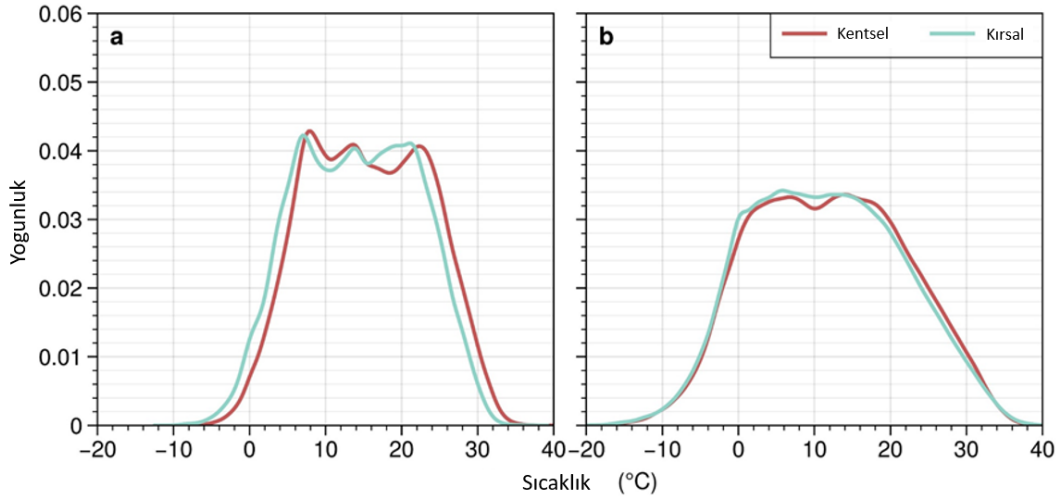
Ayrıca, belirli bir sıcaklık eşliğinin üzerindeki gün sayısını hesaplayan bir eşik analizi de gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın amacının kentselleşme kaynaklı aşırı sıcaklıkları tasvir etmek olmadığından, sıcaklık eşliği daha ılımlı bir değeri olan 30°C seçilmiştir. İlk olarak, günlük maksimum sıcaklığın 30°C'nin üzerinde olduğu yıllık gün sayısını bağımsız olarak kentsel ve kırsal ızgaralarda hesaplanmıştır. Daha sonra, bu değerler listelenmekte ve sırasıyla kentsel ve kırsal ızgaraları temsil eden her listeden orta değer seçilmektedir. Son olarak, bu analiz 2011-2016 için CHIRTS ve yer gözlem verilerini kullanarak gerçekleştirilmektedir. Tablo 1, kentsel ve kırsal ızgaralar için hesaplanan gün sayılarını karşılaştırmaktadır. Tablo 1'deki verilere bakıldığında, analiz edilen yedi yıllık dönemde 30°C'nin üzerindeki gün sayısının Ankara'da İstanbul'dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, genellikle kentsel ızgaraların seçilen eşik değerin üzerindeki gün sayısının kırsal ızgaralardan daha yüksek olduğu açıktır. Birkaç istisna mevcuttur: Örneğin, Ankara'da 2013, 2014 ve 2016 yılları için CHIRTS verilerinden elde edilen karşılık gelen değerler. Ayrıca, Ankara'nın kentsel ve kırsal ızgaraları için sayıların birbirine görece daha yakın olduğunu ve önemli yıllık değişim olmaksızın varlığını sürdürdüğünü, bu durumun da Ankara'nın kentsel ve kırsal ızgaraları arasındaki sıcaklık değişkenliğinin İstanbul'dan daha az olduğunu tekrar teyit ettiği belirtilmektedir.

Tablo 1. Kentsel ve kırsal konumlar için 2011 ile 2016 arasında 30°C'nin üzerindeki gün sayısı

Land Type	İstanbul						Ankara					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CHIRTS												
Urban	16	42	15	16	17	34	26	57	33	53	49	48
Rural	8	33	6	6	12	23	25	54	34	55	49	51
OBS												
Urban	32	50	32	39	36	50	40	66	40	60	59	50
Rural	4	25	3	19	20	24	30	59	32	56	48	52



Şekil 5. Kernel yoğunluk kestirimi analizi tarafından ortaya konan İstanbul (a) ve Ankara (b) şehirlerindeki kentsel ve kırsal ızgaralar için MODIS arazi yüzeyi sıcaklığına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları



Şekil 6. Kernel yoğunluk kestirimi analizi tarafından ortaya konan İstanbul (a) ve Ankara (b) şehirlerindeki kentsel ve kırsal ızgaralar için 2 metre hava sıcaklığına ilişkin olasılık yoğunluk fonksiyonları

## SONUÇLAR

Bu çalışma, Türkiye'nin en kalabalık şehirlerinden İstanbul ve Ankara'nın kentsel ve kırsal konumları üzerinde arazi yüzeyi ve hava sıcaklığı değişikliklerini karşılaştırmaktadır. Analizler, yer ve uydu gözlemlerinden elde edilen sıcaklık gözlemlerine, ERA-5 yeniden analizinden türetilmiş günlük sıcaklık ürünü de dahil olmak üzere farklı veri kaynaklarına dayanmaktadır. Sonuçlar, İstanbul'da uzun vadeli sıcaklık değişkenliğinin Ankara'ya kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir, daha yüksek aylık, mevsimsel ve yıllık UHI büyüklükleriyle belirgin hale gelmektedir. Ankara'da 2011 ile 2018 arasındaki yıllık UHI büyüklüğünün maksimum değeri 1,0°C'nin altında olmasına rağmen, İstanbul'da bu değer 2,5°C'nin üzerindedir. Genellikle, Ankara'daki aylık ve mevsimsel UHI büyüklükleri bu maksimum yıllık UHI değerinden bile daha düşüktür. Ayrıca, kernel yoğunluk kestirimi analizi hem İstanbul hem de Ankara'daki arazi yüzeyi ve hava sıcaklığı değişkenlerinin konum parametresinde pozitif bir kayma olduğunu göstermektedir, ancak bu kayma İstanbul için daha belirgindir. Bu bağlamda, İstanbul'da kentsel arazi kullanımının sıcaklık üzerinde daha fark edilebilir bir etkisinin iklim değişimine bağlı sıcaklık artışlarının daha şiddetli olmasını sağlayabilir.

Bu çalışmada kentsel ve kırsal sınıflandırmaların doğrudan bir arazi örtüsü veri setinden gelen kentsel ve kırsal ızgaralara dayandığını belirtmek önem arz etmektedir. Başka bir yaklaşım, Yao vd. (2022) tarafından yapıldığı

gibi, her veri gridi veya her hava istasyonu konumu etrafında değişik yarıçaplı dairesel tampon bölgeler tanımlamak ve o dairesel alan içindeki kentsel arazi örtüsü alanlarının yüzdesini hesaplamak ve bu ızgaranın veya istasyon konumunun arazi kullanım sınıflandırmasını iyileştirmektedir. Ancak sonuçlar, bireysel şehirlerin sıcaklık değişkenliğinin kentleşmeye yanıt olarak nasıl farklılık gösterebileceğini vurgulamaktadır ve çalışmaların kent özelinde yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

## KAYNAKLAR

- Argueso, D., Evans, J. P., Fita, L., Bormann, K. J., 2014. Clim. Dyn. 42, 2183-2199. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1789-6>.
- Chapman, S., Watson, J. E. M., Salazar, A., Thatcher, M., McAlpine, C. A., 2017. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. Landscape Ecol. 32, 1921-1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>.
- Dihkan, M., Karsli, F., Guneroglu, A., Guneroglu, N., 2015. Evaluation of surface urban heat island (SUHI) effect on coastal zone: The case of Istanbul megacity. Ocean & Coastal Management 118, 309-316. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.008>.
- Doan, Q. V., Kusaka, H., Ho, Q. B., 2016. Impact of future urbanization on temperature and thermal comfort index in a developing tropical city: Ho Chi Minh City. Urban Clim. 17, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.003>.
- Donmez, B., Donmez, K., Diren-Ustun, D., Unal, Y., 2021. The Impact of Urban Land Use On the Springtime Frontal Precipitation Event in Ankara: A Case Study of 5 May 2014. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-3056. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3056>, 2021.
- Donmez, K., Donmez, B., Diren-Ustun, D., Unal, Y., 2021. Assessment of Urbanization Impact On Heavy Precipitation in Istanbul, Turkey. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-3057. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3057>, 2021.
- Gabriel, K. M., Endlicher, W. R., 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environ Pollut. 159 (8-9), 2044-2050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016>.
- Karaca, M., Tayanc, M., Toros, H., 1995. Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. Atmospheric Environment 29 (23), 3411-3421. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00085-D](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00085-D).
- Khorrami, M., Gunduz, O., 2020. patio-temporal interactions of surface urban heat island and its spectral indicators: A case study from Istanbul metropolitan area, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment 192 (6). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08322-1>.
- Li, Y., Fowler, H. J., Argueso, D., Blenkinsop, S., Evans, J. P., Lenderink, G., Yan, X., Guerreiro, S. B., Lewis, E., Li, X., 2020. Strong intensification of hourly rainfall extremes by urbanization. Geophys. Res. Lett. 47 (14). <https://doi.org/10.1029/2020gl088758>.
- Liao, W., Liu, X., Li, D., Luo, M., Wang, D., Wang, S., 2018. Stronger contributions of urbanization to heat wave trends in wet climates. Geophys. Res. Lett. 45, 11310-11317. <https://doi.org/10.1029/2018GL079679>.
- Lu, F., Xiao, W.H., Yan, D.H., Wang, H., 2017. Progresses on statistical modeling of nonstationary extreme sequences and its application in climate and hydrological change. J. Hydraul. Eng. 48 (4), 379-389. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxh.20160281>.
- Lu, M., Xu, Y., Shan, N., Wang, Q., Yuan, J., Wang, J., 2019. Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region. Sci. Total Environ. 673, 64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.413>.
- Niyogi, D., Osuri, K. K., Busireddy, N., Nadimpalli, R., 2020. Timing of rainfall occurrence altered by urban sprawl. Urban Clim. 33, 100643. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100643>.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., Nairn, J. R., 2012. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. Geophys. Res. Lett. 39, L20714. <https://doi.org/10.1029/2012GL053361>.
- Pesaresi, M., Florczyk, A., Schiavina, M., Melchiorri, M., Maffeni, L., 2019. GHS settlement grid, updated and refined REGIO model 2014 in application to GHS-BUILT R2018A and GHS-POP R2019A, multitemporal (1975-1990-2000-2015), R2019A. European Commission, Joint Research Centre (JRC). <http://doi.org/10.2905/42E8BE89-54FF-464E-BE7B-BF9E64DA5218>.
- Shimadera, H., Kondo, A., Shrestha, K. L., Kitaoka, K., Inoue, Y., 2015. Numerical evaluation of the impact of urbanization on summertime precipitation in Osaka, Japan. Advances in Meteorology 1-11, <https://doi.org/10.1155/2015/379361>.
- Turkoglu, N., 2009. Analysis of urban effects on soil temperature in Ankara. Environmental Monitoring and Assessment, 169(1-4), 439-450. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1187-z>.
- Unal, Y., Sonuc, C. Y., Incecik, S., Topcu, S., 2020. Investigating urban heat island intensity in Istanbul. Theor. Appl. Climatol. 139 (84), 175-190. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02953-2>.
- Verdin, A., Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Tuholske, C., Grace, K., 2020. Development and validation of the CHIRTS-daily quasi-global high-resolution daily temperature data set. 7 (303). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00643-7>.
- Wan, Z., Hook, S., Hulley, G., 2015. MOD11\_L2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 5-Min L2 Swath 1km V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. [https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11\\_L2.006](https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11_L2.006).
- Yao, R., Zhang, S., Sun, P., Dai, Q., Yang, Q., 2022. Estimating the impact of urbanization on non-stationary models of extreme precipitation events in the Yangtze River Delta metropolitan region. Weather and Climate Extremes, 36, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100445>.
- Zaeemdar, S., Baycan, T., 2017. Analysis of the relationship between urban heat island and land cover in Istanbul through Landsat 8 OLI. Journal of Earth Science & Climatic Change 8 (11). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000423>.

Zhang, G., Azorin-Molina, C., Wang, X., Chen, D., McVicar, T. R., Guijarro, J. A., Chappell, A., Deng, K., Minola, L., Kong, F., Wang, S., Shi, P., 2022. Rapid urbanization induced daily maximum wind speed decline in metropolitan areas: A case study in the Yangtze River Delta (China). *Urban Clim.* 43, 101147. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101147>.





## GNSS VERİLERİ VE NEQUICK2 MODELİ KULLANILARAK HORSESHOE ADASI (ANTARKTİKA) İYONOSFERİK LEVHA KALINLIĞI TAHMİNİ

Furkan Ali Küçük<sup>1</sup>, M. Baran Ökten<sup>2</sup>, Erhan Arslan<sup>1</sup>, M. Oğuz Selbesoğlu<sup>3</sup>, H. Hakan Yavaşoğlu<sup>3</sup>,  
Burcu Özsoy<sup>4</sup>

<sup>1</sup>TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü, Kocaeli

<sup>2</sup>Warwick Üniversitesi, Füzyon, Uzay ve Astrofizik Merkezi, Fizik Bölümü, Coventry, Birleşik Krallık

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği, İstanbul

<sup>4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma Mühendisliği, İstanbul  
furkan.kucuk@tubitak.gov.tr

### Özet

İyonosferik levha kalınlığı, toplam elektron içeriği (TEC) F2 katmanı tepe elektron yoğunluğuna (NmF2) oranıdır ve iyonosferi temsil eden önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan veriler 67° 49' 54,3747" Güney enlemi, 67° 14' 17,0298" Batı boylamı Horseshoe Adası için elde edilmiştir TUR 1 GNSS alıcısından ve Küresel İyonosfer Radyo Gözlemeviden (GIRO) alınan TEC ve F2-bölgesinin kritik frekansının (foF2) verileri kullanılarak iyonosferik levha kalınlığındaki değişim hesaplanmıştır. Bununla birlikte NeQuick2 modeli kullanılarak ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Aralık 2021'de seçili günlerde Güneş çevriminin minimum, jeomanyetik fırtınaların büyüklüğünü karakterize etmek için kullanılan Kp indeksinin 4 değerinde ve Dst indeksinin ise -30 nT'den küçük değerde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, 2021 yılı aralık ayına aylık ortalama F10,7 cm gözlemlenen akı 102,94 sfu olarak hesaplanmıştır. Ancak, 27 Aralık 2021 tarihinde AE indeksinin 500 nT 'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun iyonosferik levha kalınlığı değişiminde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ön bulgularımız Horseshoe Adası'nda gelecekte yapılacak iklim değişikliği ve uzay havası tahminlerinde için bir temel oluşturacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Antarktika, Toplam Elektron İçeriği, İyonosfer, Levha Kalınlığı, Güneş Aktivitesi

## HORSESHOE ISLAND (ANTARCTICA) IONOSPHERIC THICKNESS ESTIMATION USING GNSS DATA AND NEQUICK2 MODEL

### Abstract

Ionospheric plate thickness is the ratio of total electron content (TEC) to F2 layer peak electron density (NmF2) and is an important parameter representing the ionosphere. The data used in this study were obtained for Horseshoe Island at 67°49' 54.3747" S latitude, 67°14' 17.0298" W longitude. Data of TEC and critical frequency of the F2-region (foF2) from the TUR 1 GNSS receiver and the Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO). The change in ionospheric plate thickness was calculated using. However, it was compared using the NeQuick2 model. In the study, it was determined that on selected days in December 2021, the solar cycle was at its minimum, the Kp index used to characterize the magnitude of geomagnetic storms was 4, and the Dst index was less than -30 nT. However, the monthly average F10.7 cm observed flux for December 2021 was calculated as 102.94 sfu. However, on December 27, 2021, the AE index was found to be greater than 500 nT. It has been observed that this situation is effective in the change in ionospheric plate thickness. Our preliminary findings will provide a basis for future predictions of climate change and space weather at Horseshoe Island.

**Keywords:** Antarctic, Total Electron Content, Ionosphere, Plate Thickness, Solar Activity

**Sorumlu Yazar:** Furkan Ali Küçük

**Geliş Tarihi:** 17 Nisan 2024

**Kabul Tarihi:** 28 Haziran 2024

**Yayın Tarihi:** 3 Temmuz 2024

**Atıf Şekli:** Küçük, F.A., Ökten, M.B., Arslan, E., Selbesoğlu, M.O., Yavaşoğlu, H.H., Özsoy, B. (2024). GNSS Verileri ve NEQUICK2 Modeli Kullanılarak Horseshoe Adası (Antarktika) İyonosferik Levha Kalınlığı Tahmini, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 49-58.

**Makale Tipi:** Araştırma Makalesi

**e-ISSN:** 3023-8560

## GİRİŞ

Toplam elektron içeriği (TEC: Total Electron Content)'nin F-tabakası tepe elektron yoğunluğuna (NmF2) oranı iyonosfer levha kalınlığı ( $\tau$ ) olarak ifade edilir. Bu kavram, iyonosferin hem üst hem de alt bölümü hakkında bilgi veren bir elektron yoğunluğu profili faktörüdür. TEC ve NmF2 oranı, iyonosferin yapısını ve davranışını anlamada önemli bir kavramdır. Bu oran, genellikle elektron yoğunluğunun dağılımını ve iyonosferin genel özelliklerini değerlendirirken kullanılır. TEC parametresinin birimi TECU'dur. 1 TECU,  $10^{16}$  elektron/m<sup>2</sup> 'ye eşittir (Huang vd., 2016).

Levha kalınlığı ne kadar düşükse, profil o kadar keskin ve tepe elektron yoğunluğu da o kadar belirgin olur. Ayrıca  $\tau$ , yalnızca iyonosferdeki elektron yoğunluğunu değil, aynı zamanda yüksüz parçacıkların sıcaklığı hakkında da bilgi içerir. Bu, iyonosferin fiziksel özelliklerini anlamada önemli bir faktördür. Bu bilgi, varsayılan bir elektron yoğunluğu profili kullanılarak elde edilebilir ve iyonlaşabilir parametrelerin ölçek yüksekliği ile ilişkilendirilebilir.  $\tau$ , NmF2 ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki, TEC ve radyo dalgasının elektrik alanının kırılması hakkında tahminler yapmayı sağlar. Bu nedenle, levha kalınlığı, uydudan yere ulaşan radyo dalgası iletişimde oldukça yararlı bir parametre olarak kabul edilir (Pignalberi vd., 2022). İyonosferik levha kalınlığının herhangi bir konumda incelenmesi, iyonizasyon dağılımının doğası hakkında bilgi sağlar (Titheridge vd., 1973).

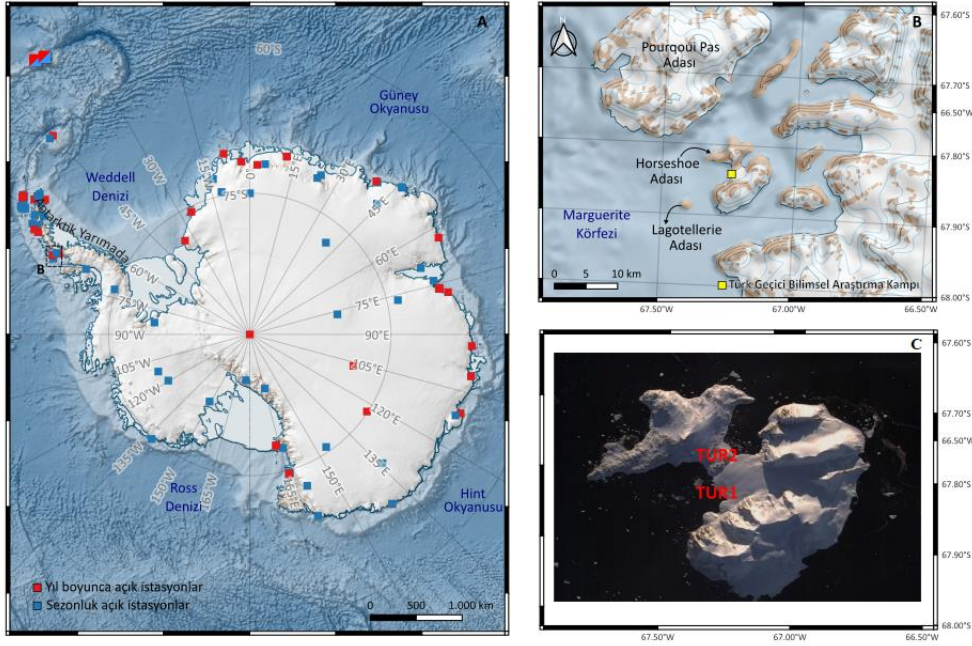
İyonosferin en tanımlayıcı parametresi elektron yoğunluğu içeriğidir. Zamana ve konuma bağlı değişiklik gösterir. Gelen Güneş radyasyonu, iyonosferdeki atom ve moleküllerin iyonlaşarak pozitif yüklü iyonları ve serbest elektronlar oluşturmasına sebep olur. Gün doğumuyla birlikte artan elektron yoğunluğunu, günbatımı ile iyon ve elektronların tekrar birleşmesi nedeniyle azalmaktadır. Gelen güneş radyasyonu ve güneş aktiviteleri iyonosferdeki electron yoğunluğunu değişimi üzerinde etkili bir rol oynamaktadır (Canyılmaz vd., 2016).

Güneş parlamalarının iyonosferdeki etkilerini izlemek ve analiz etmek için Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) verileri kullanmak idealdir. GNSS teknolojisinin kullanıldığı çalışmalarda serbest elektron miktarı TEC parametresi ile temsil edilir. Elde edilen TEC verileri, IGS İyonosfer Ortak Analiz Merkezleri (IGS-IAACs: International GNSS Service-Ionosphere Associate Analysis Centers) bünyesinde birçok farklı dünya genelinde farklı ülkelerdeki araştırma kuruluşları tarafından üretilen küresel iyonosfer haritalarına katkı sağlar ve önemli sayıda kullanıcıya günlük iyonosfer bilgisi sunar (Jin vd., 2007).

Ancak Antarktika gibi lojistik olarak ulaşılması zor bir bölgede sürekli küresel iyonosfer haritalarının oluşturulmasına katkı sağlamak ve günlük iyonosfer bilgisini vermek oldukça zordur. Bu nedenle birçok kurum ve kuruluştaki araştırmacılar GNSS ve GPS istasyonları kullanarak bölgesel iyonosfer haritaları oluşturarak katkı sağlamaktadır (Şentürk, 2021). Farklı sınıftan Güneş parlamaları kutup iyonosferini çeşitli şekillerde etkiler ve düzensizliklere yol açar (Selbesoğlu vd., 2021). Antarktika üzerindeki manyetik aktivite, güneş parlamaları ve diğer güneş aktivitelerine ilişkili GPS/GNSS faz sintilasyonu ile ilgili yapılmış çok sayıda çalışma (Kinrade vd., 2012; Guo vd., 2017; Pan vd. 2014) olmasına rağmen bu çalışmayla birlikte Horseshoe Adasında iyonosferik levha kalınlığının güneş aktivitesinden nasıl etkilendiği incelenip literature katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu ve benzer çalışmalar, Türkiye'nin Antarktika Antlaşması Sistemi'nde (ATS) etkin bir rol oynamasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, Türkiye'deki bilim insanları ve mühendislerin ileri teknoloji kullanımı ve geliştirilmesi konularında deneyim kazanmalarını sağlayacaktır. Antarktika gibi ekstrem bölgelerde elde edilen veriler, küresel iklim modellerine katkı sağlayarak iklim değişikliği ve uzay havası tahminleri konularında daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır. Aynı zamanda, Türkiye'nin Antarktika'daki bilimsel varlığını güçlendirecek ve bölgedeki jeopolitik stratejilerde etkin bir rol oynamasına katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu tür çalışmalar, ülkemizin bilimsel ilerlemesi ve küresel bilimsel işbirliğindeki rolünü pekiştirecektir.

## GÖZLEMLER VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada kullanılan veriler, Batı Antarktika'da yer alan Türk Bilimsel Araştırma Kampı'nın bulunduğu Horseshoe Adası'nda konuşlandırılan GNSS (Global Navigation Satellite System - Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi) istasyonundan elde edilmiştir. Şekil 1'de istasyonun konumu gösterilmiştir. Bu sistem, Ulusal Antarktika Bilim Seferi'ne (Turkish Antarctic Expedition - TAE) katılan araştırmacılar tarafından Şubat 2020'de kurulmuştur. Antarktika kıtasında, TAE seferlerinin gerçekleştirildiği ve ilerleyen yıllarda Türkiye'nin Antarktika'daki bilim üssüne ev sahipliği yapması planlanan Horseshoe Adası, yaklaşık olarak  $67,83^\circ$  G enlemi ve  $67,24^\circ$  B boylamında yer almaktadır (Küçük, 2022).



**Şekil 1.** Antarktika Haritası (A), Horseshoe Adası (B) ve Horseshoe Adası'ndaki ilk GNSS alıcıları işaretleri konumları (TUR-1 ve TUR-2) (C)

GNSS ağı, dünya genelinde konum belirleme, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sağlayan uydu tabanlı bir sistemdir. GNSS, çeşitli ülkeler tarafından geliştirilen ve işletilen birden fazla uydu sistemi içerir. GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydularından sinyal verilerini kaydedebilmektedir. GPS uyduları dünya çevresindeki altı yörünge düzlemine yayılmış yaklaşık 20.200 km yükseklikte bulunan 24'ten fazla uydudan oluşmaktadır. Her uydu, biri  $f_1 = 1575,42$  MHz, diğeri  $f_2 = 1227,60$  MHz olmak üzere iki frekansta sinyal gönderir. Horseshoe Adası'nda hali hazırda yer alan iki GNSS alıcısı TUR 1 ve TUR 2 olarak adlandırılmıştır. Bu iki istasyon alıcısı da 1'er dakikalık örnekleme hızında sinyalleri izlemek üzere ayarlanmıştır (Selbesoğlu vd., 2021). Çalışmada kullanılan veriler,  $67^\circ 49' 54,3747''$  Güney enlemi ve  $67^\circ 14' 17,0298''$  Batı boylamında yer alan TUR 1 isimli GNSS alıcısından elde edilmiştir. Bu veriler, G02 numaralı GPS uydusundan alınmıştır. İyonosfer dağınık bir ortam olduğundan, bilim insanları, çift frekans alıcılar tarafından kaydedilen taşıyıcı fazlar ve faz kodları üzerindeki modülasyon ölçümleriyle iyonosferik etkileri değerlendirebilirler. Özellikle GNSS alıcılarından elde edilen veriler sayesinde TEC, güneş kaynaklı farklı bölgelerde meydana gelen Güneş parlamalarının iyonosfer üzerine etkisi incelenebilir (Priyadarshi vd., 2021). Geliştirilen çeşitli modeller yardımıyla bölgesel iyonosferik haritalar oluşturulmaktadır. Geliştirilen mevcut modellerin çoğu alçak ve orta enlemleri hedef almaktadır. Orta ve alçak enlemlerin aksine; iyonosferin güneş aktivitesi seviyesinden doğrudan etkilendiği kutup bölgelerinin iyonosferi, elektron yağışları ve elektron yoğunluklarındaki düzensizlikler tarafından yönlendirilir (Liu vd., 2006). Dünya iyonosferinin doğru modellenebilmesi için küresel çapta veriye ihtiyaç vardır. Ancak bu durumu sağlayabilmek maliyetli ve uzun süreli olacaktır. Yeni teknolojilerin

gelişmesiyle birlikte, dünya çapında 80'den fazla konumda kurulu olan digisonde istasyonlarının katkısı ile Global İyonosferik Radyo Gözlem Evi (GIRO) portalı oluşturulmuştur: <http://giro.uml.edu>. Günümüzde, GIRO, 64 konumda toplamda 30 milyondan fazla iyonosferik ölçüm kaydına, 42 gerçek zamanlı RINEX veri akışına açık erişim sağlanmaktadır.

TEC, iki frekans arasındaki zaman gecikmesiyle ölçülür. Şu anda tüm GNSS istasyonları (GPS, GLONASS ve diğerleri) iki veya daha fazla frekansta çalışmaktadır. Uzay fiziği, jeodezi bilimi, arazi ölçümü ve yüksek hassasiyetli tarım gibi bazı kullanımlar yüksek hassasiyetli ölçümler gerektirir. Dünya genelinde bulunan bu çift frekanslı alıcıların verileri, günlük GNSS TEC haritalarını hesaplamak için kullanılır (Reinisch ve Galkin, 2011). GNSS verileri RINEX adı verilen bir formatta kaydedilir. Kaydedilen veriler, "gnss-tec" kütüphanesinin yardımıyla dönüştürülmüştür. "gnss-tec", küresel navigasyon uydu sistemleri (GPS, GLONASS vb.) tarafından sağlanan verileri kullanarak iyonosferde toplam elektron içeriğini yeniden oluşturmak için kullanılan bir Python paketidir. Kütüphane modülü, RINEX gözlem dosyalarından taşıyıcı fazı ve yarı-yol ölçümlerini girdi olarak kullanır (Web 1). GNSS verileri UT zaman diliminde kaydedilir. foF2 verileri ise, Küresel İyonosfer Radyo Gözlemevi (Global Ionospheric Radio Observatory – GIRO) portalından alınmıştır. GIRO portalı kullanılarak 67° 49' 54,3747" Güney enlemi, 67° 14' 17,0298" Batı boylamı için foF2 verileri saatlik olarak türetilmiştir.

Tepe elektron yoğunluğu (NmF2), aşağıdaki Eşitlik 1 ve 2'de gösterilen ilişki kullanılarak hesaplanmıştır.

$$NmF2 = 1,24(foF2)^2 \times 10^{10} \text{ el} \cdot \text{m}^{-3} \quad (1)$$

foF2 MHz olmak üzere,

İyonosferik eşdeğer levha kalınlığı ( $\tau$ ): vTEC'in Nm F2'ye oranı olarak tanımlanır:

$$\tau = \frac{vTEC}{NmF2} \quad (2)$$

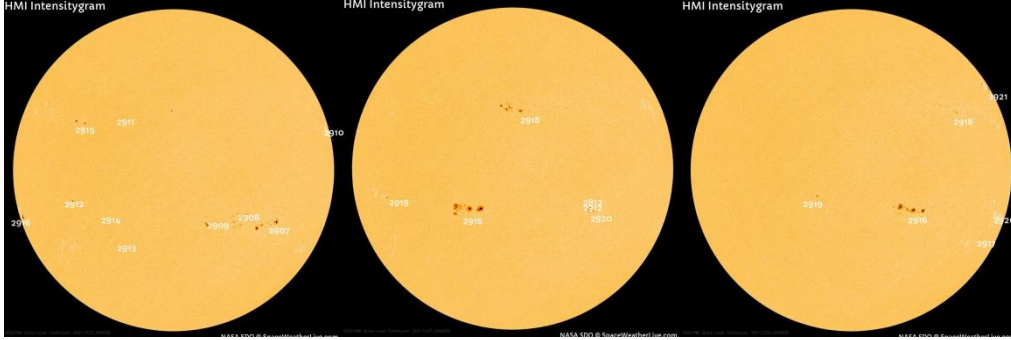
Burada NmF2, F bölgesinin  $\text{el m}^{-3}$  cinsinden maksimum elektron yoğunluğudur. Sonuç olarak  $\tau$ , metre (m) cinsinden ifade edilir. Tüm dikey elektron yoğunluğu profiline eşdeğer bir vTEC değeri ile NmF2'ye eşit sabit elektron yoğunluğuna sahip ideal bir iyonosferik levhanın kalınlığını temsil eder. GIRO portalından elde edilen verilerin saatlik olarak alınabilmesi nedeniyle levha kalınlığının hesaplanabilmesi için TEC verilerinin saatlik ortalaması alınmıştır. Levha kalınlığı, yerel saatin bir fonksiyonu olarak her gün için ayrı ayrı 1 saatlik aralıklarla belirlenmiştir. Bu yöntem, iyonosferik levha kalınlığının günlük ve saatlik değişimlerini daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılar.

İyonosferik koşulların tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan iki ampirik ve iklimsel model bulunmaktadır: Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) ve NeQuick. Bu modeller, fiziksel modellere göre belki daha az hassas olmalarına rağmen iyonosferik koşulların neredeyse anlık tahmin edilmesi gereken durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Osanyin vd., 2023). NeQuick modelinde veri alımının ana prensibi, yerel güneş radyo akısı veya iyonizasyon seviyesini belirleyerek model ile gözlemlenen TEC değerleri arasındaki farkı minimize etmektir (Nava vd., 2006). NeQuick2 modeli için doğrulama amaçlı olarak TEC verileri kullanılmıştır. NeQuick2, Abdus Salam Uluslararası Teorik Fizik Merkezi (ICTP) Astronomi ve Radyo Yayılım Laboratuvarı'nda geliştirilen iyonosfer elektron yoğunluğu modelinin en son sürümüdür. NeQuick2, yükseklik, jeosantrik enlem, jeosantrik boylam gibi koordinatlarla iyonosferdeki konumlar için elektron yoğunluğunu bir küre üzerindeki koordinatlara verir. Bu model paketi ile birlikte herhangi bir konumdan uyduya düz bir çizgi üzerinde noktasal elektron yoğunluğu hesaplanabilir (Usoskin, 2017).

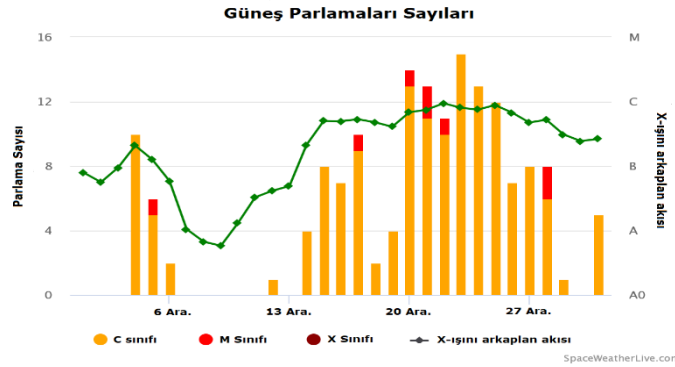
Şekil 2, sırasıyla 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerindeki güneş lekelerinin konumunu ve büyüklüğünü göstermektedir. Aynı zamanda, Güneş'in kendi eksenini etrafında her gün belirli bir miktar döndüğünü ve bu



nedenle bazı güneş lekelerinin Güneş'in arka tarafına geçtiğini ifade etmektedir. Şekil 3, GOES uyduları tarafından Aralık 2021'de gözlemlenen güneş parlaması olaylarını göstermektedir. Şekil 3'ten görüleceği gibi aralık ayı içerisinde çoklu C sınıfı parlaması meydana geldiği açıkça görülüyor. Bununla birlikte sadece 6 günde M sınıfı parlaması görülmüştür. Ayrıca, aralık ayı içerisinde X sınıfı parlaması görülmemiştir.



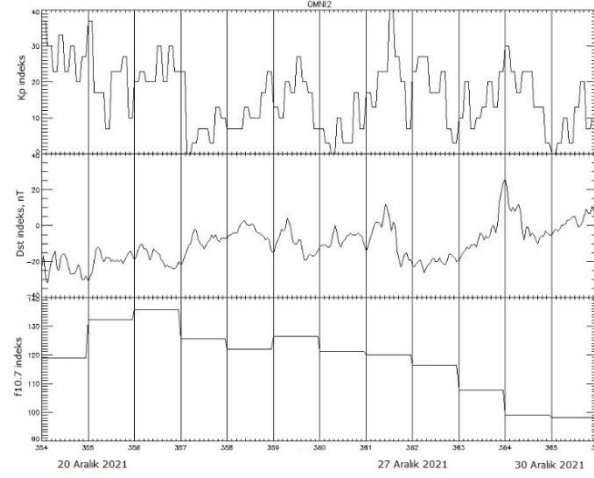
Şekil 2. Sırasıyla 22, 27 ve 30 Aralık 2021 için Güneş lekeleri bölgelerini içeren Güneş haritaları (Web-2)



Şekil 3. Aralık ayı için güneş parlamaları sayısı (Web-2)

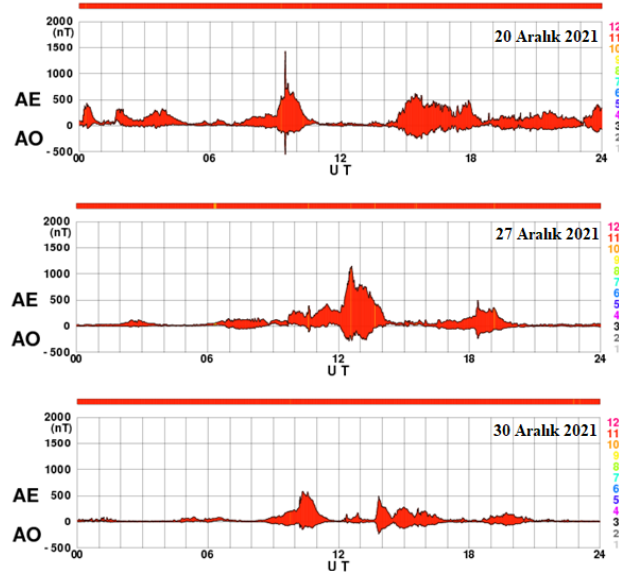
Güneş aktivitesinin iyonosferin dinamikleri üzerindeki doğrudan etkisi, literatürde iyi bilinmektedir (Nava vd., 2006). Güneş, dünya iyonosferindeki molekülleri iyonize eden başlıca enerji kaynağıdır. Güneş radyasyonu farklı yüksekliklerde eşit olmayan bir şekilde dağılır ve bu durum elektron yoğunluğunda dalgalanmalara neden olur. Ayrıca, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi, günlük elektron yoğunluğu değişimlerinde önemli bir rol oynar. Bu durum, güneş radyasyonunun TEC değişimleriyle güçlü bir ilişkisini gösterir. TEC dalgalanmalarını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır; bunlar arasında güneş parlamaları, güneş radyasyonu miktarı ve fotoiyonizasyona bağlı değişkenlik, güneş rüzgarı-manyetosfer-iyonosfer etkileşimi ve bu etkileşimin bileşenleri önemlidir (Web 2). İyonosferik TEC değişimlerinin ve ampirik modellerin incelenmesinde jeomanyetik parametre olarak genellikle Kp ve Dst indeksleri kullanılmaktadır. F10.7 cm akısı, güneş lekeleri sayısı, Kp ve Dst, AE indeksleri OMNIWEB'den (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) tedarik edilebilir. F10.7 ve SSN'nin zamansal çözünürlüğü günlük iken, jeomanyetik Kp ve Dst indeksinin zamansal çözünürlükleri sırasıyla 3 saat ve 1 saattir.





Şekil 4. 20 – 31 Aralık 2021 tarihleri boyunca F10.7 cm akısı, Kp ve Dst indeksleri grafiği gösterilmektedir.

Şekil 4’te 20, 27 ve 30 Aralık tarihlerinde  $Dst_{min}$  sırasıyla  $> -20$  nT,  $> -30$  nT ve  $> 0$  nT iken, Kp indeks değeri 4, 1 ve 1 olarak görülmektedir. Ancak 27 Aralıktan hemen önce Kp indeks değerinin tekrar 4’e kadar çıktığı görülmektedir. 2021 yılı aralık ayında aylık ortalama F10.7 cm gözlemlenen akı  $102.94$  sfu ( $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ) olarak hesaplanmıştır. 21 Aralık 2021 tarihi için ölçülen F10,7 cm akısı  $115$  sfu, 27 Aralık 2021 tarihi için  $125$  sfu ve 30 Aralık 2021 için ise  $111$  sfu olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için AE indeksleri grafiği gösterilmektedir.

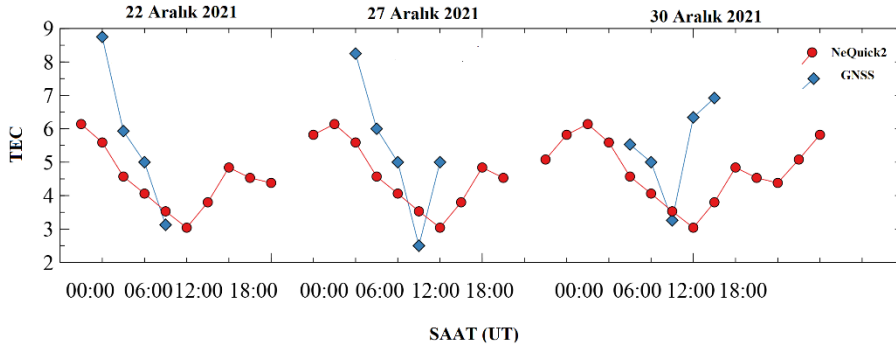
Şekil 5’te 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerinde manyetik aktivitelerin olduğunu ve dolayısıyla manyetik aktivite ile ilişkili dinamiklerin hali hazırda işlemekte olduğu gösterilmektedir. 20 Aralık 2021 tarihinde AE indeksi, 10:30 UT’de yaklaşık  $1500$  nT değerine ulaşmış ve daha sonra 15:00 UT’de  $500$  nT ve üzerinde kalmıştır. 27 Aralık 2021 tarihinde 12:30 UT zaman diliminde  $1000$  nT ve üzerinde olduğu görülürken, aynı gün içerisinde  $500$  nT’ye yaklaşmıştır. 30 Aralık 2021 tarihinde ise 10:30 UT ve 14:00 UT zaman diliminde  $500$  nT ve üzerinde kalmıştır. Şekil 4 ve şekil 5’e bakıldığında 20 Aralık 2021 tarihinde Kp indisi 4’e kadar çıkmasına rağmen, yukarı enlemler için daha iyi bir manyetik aktivite göstergesi olan AE indisi çalışmanın yapıldığı günlerde

mikrofırtınalar olduğunu göstermektedir. Bu değerler, manyetik aktivitenin yoğun olduğunu ve jeomanyetik fırtınaların etkilerinin gözlemlendiğini işaret etmektedir.

### MODEL VE GÖZLEM KARŞILAŞTIRMASI

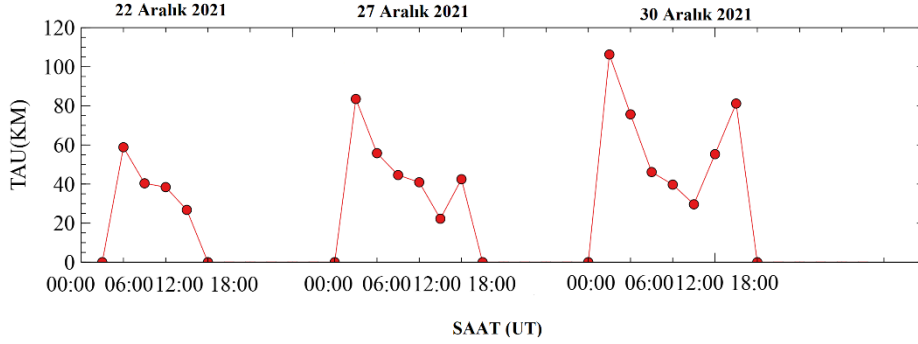
Çalışmamızda, Antarktika Horseshoe Adası'nda yer alan Türk Bilimsel Araştırma Kampı'nda bulunan TUR 1 isimli GNSS alıcısından elde ettiğimiz TEC ölçümleri ile GIRO portalından elde edilen iyonosferik elektron yoğunluğu profillerini kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güneş çevrimin ve güneş aktivitesinin minimum seviyede olduğu günlerde iyonosferik TEC değişimini nasıl etkilediğini göstermek amacıyla analiz edilmiştir. Ayrıca, iyonosferik levha kalınlığı, NeQuick2 modeli çıktısı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, güneş aktivitesinin iyonosferik özellikler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına ve bu etkilerin ölçüm ve modelleme araçlarıyla nasıl analiz edilebileceğine dair bir temel sağlamaktadır.

TEC verileri G02 GPS uydusundan elde edilebilirken, aşırı hava koşulları ve teknik aksaklıklar nedeniyle sınırlı ve eksik veri seti bulunmaktadır. Bu nedenle, bu makaledeki tüm tartışmalarımızda, güneş çevriminin minimum olduğu 2021 yılı aralık ayı seçilmiştir. Seçilen dönem içerisinde veri setinin eksiksiz olduğu gün sayısının kısıtlı olmasından dolayı 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerini içeren üç günlük bir veri seti seçilerek farklı bir bakış açısı sunulmak istenmiştir.



Şekil 6. 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için G02 GPS Uydusu verisi ve NeQuick2 modeli kullanılarak oluşturulan TEC grafiği gösterilmektedir.

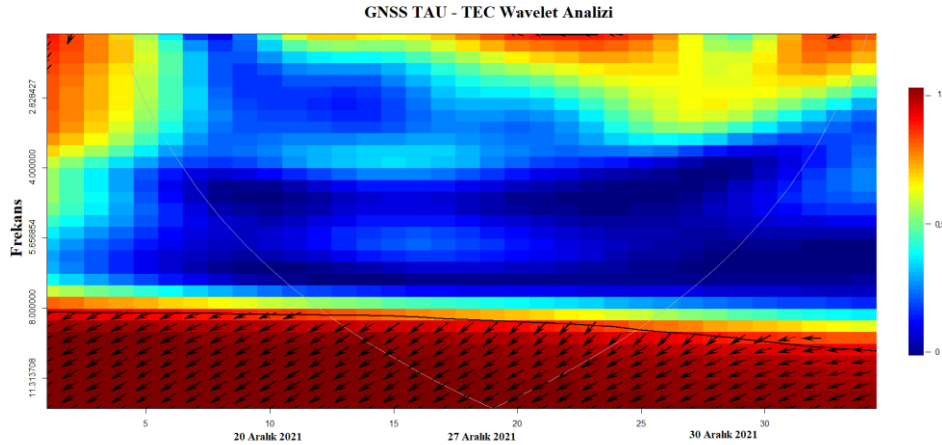
Şekil 6, 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihinde GNSS verileriyle günlük TEC davranışını ve NeQuick2 model çıktılarını göstermektedir. Şekilden, Güneş'in doğuş ve batışına göre günlük TEC maksimum ve minimum değerler gözlemlenmesi olağandır. Aralık ayı, Antarktika'da yaz mevsiminin başlangıcıdır ve günler uzamaya başlar. Ancak ana yaz mevsimi olan Ocak-Şubat'ın aksine, aralık ayında akşam süresi çok uzun değildir. Güneşin ufkun altına inip alacakaranlık tanısı oluşturmamasından kaynaklı olarak gelen güneş radyasyonunun neredeyse 24 saat mevcut olduğu gösterilmektedir. Ancak iyonosferik değişiklikleri gözlemlemek için aylık ve dönemsel eksiksiz veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. GNSS alıcısından elde edilen TEC değerleri ile 00:00 UT'den 12:00'ye kadar azalma görülmektedir. Veri setindeki eksiklikten dolayı 12:00 UT ve sonrası için TEC değeri bulunmamaktadır. NeQuick2 model çıktısı olarak elde edilen TEC değerleri 00:00 UT'den 12:00'ye kadar azalır ve sonrasında artış göstermektedir. Bu durum, gelen güneş radyasyonunun azaldığını ifade etmektedir. 12:00 UT'lerde o gün içindeki minimum değerde olduğu görülmektedir. 20 ve 27 Aralık 2021 tarihli veri setlerinde veri eksikliğinden dolayı net bir şekilde görülmesine de 30 Aralık günü 18:00 UT'den itibaren tekrar artan bir TEC değeri gözlenmektedir. 22 Aralık 2021 tarihinde, iyonosferik günlük maksimum TEC değeri 02:00 ile 04:00 UT arasında gerçekleşirken, minimum TEC değeri 08:00 UT'den sonra gerçekleşmektedir. 27 Aralık 2021 tarihinde GNSS verileri, günlük TEC davranışının 06:00 ile 08:00 UT arasında olduğunu gösterirken, iyonosferik günlük maksimum TEC değeri 02:00 ile 04:00 UT arasındadır. Son olarak, 30 Aralık 2021 tarihinde, iyonosferik günlük maksimum ve minimum değerleri veri eksikliğinden dolayı net olarak söylenememektedir.



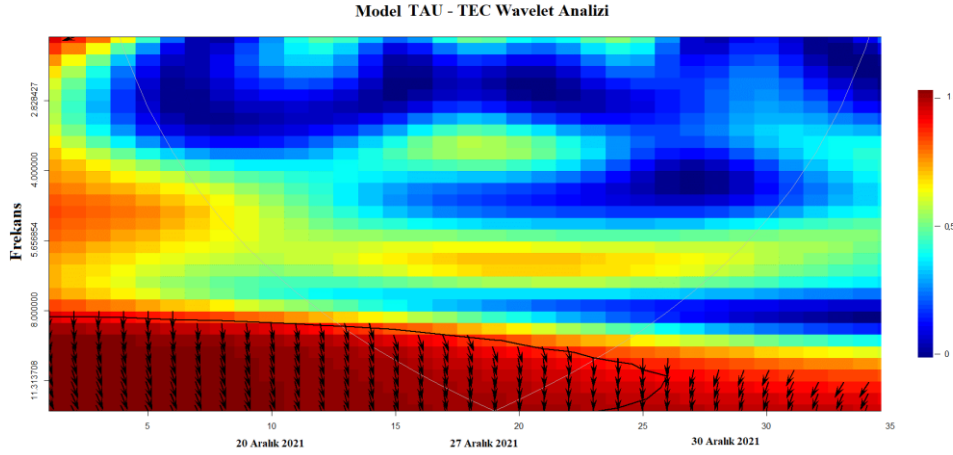
Şekil 7. 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için  $\tau$  değişimi gösterilmektedir.

Şekil 7'de gösterilen GNSS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılan NeQuick2 modeli çıktısına bakıldığında günlük TEC maksimum ve minimum değerleri görülmektedir. Şekil 7'da 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için  $\tau$  değişimi gösterilmektedir. Şekil 7'ye bakıldığında hesaplanan  $\tau$  değişimi 00:00 UT'den 06:00 UT'ye kadar artış göstermektedir. 06:00 ile 08:00 UT arası minimum azalma görülürken, 12:00 UT itibariyle hızlı bir düşüş görülmektedir. Gelen güneş radyasyonunun azalmasıyla birlikte beklenen bir durumdur.

Şekil 8 ve 9'da sırasıyla TEC ve TAU arasındaki küçük, orta ve büyük ölçeklerdeki ilişkilerin anlaşılması için dalgacık analizi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8'de GNSS verileriyle elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi grafiği gösterilirken, şekil 9'da NeQuick2 Model çıktılarında elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi grafiği gösterilmektedir. Dalgacık dönüşümü, farklı frekanslardaki durağan olmayan sinyal güçlerini analiz etmek için kullanılan modern bir matematiksel yöntemdir (Dabbakuti ve Ratnam, 2016). Her iki şekilde de zaman yatay ekseninde gösterilirken, dikey eksen frekansı ifade etmektedir (düşük frekans, büyük ölçek olarak ifade edilir). Zaman-frekans uzayında iki zaman serisinin birlikte değiştiği bölgeler dalgacık tutarlılığı ile bulunur. Sıcak renkler (kırmızı) olarak ifade edilen bölgeler, önemli karşılıklı ilişkiye sahip bölgeleri temsil etmektedir. Gözlem verileriyle elde edilen TAU ile model çıktısı olarak verilen TAU'ların karşılıklı analiz edilmesi ve ortak değişkenlik ile tutarlılığın gösterilmesi için Şekil 8 ve 9'a birlikte bakılmalıdır. Sonuç olarak, küçük ölçek olarak gösterilen 8 ile 11 frekanslarında üç gün de ortak değişkenliği ve tutarlılığı göstermektedir. 8 ile 4 frekanslarında ise GNSS ve Model çıktısı olan TAU'lar arasında pozitif bir uyum görülmemektedir. Bu durum, zaman-frekans uzayında iki zaman serisinin de birlikte uyumlu hareket ettiğini ifade eder.



Şekil 8. Gözlemlerden elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi



Şekil 9. NeQuick2 Model çıktılarından elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi

## SONUÇLAR

Bu çalışmada 2021 yılı aralık ayının Horseshoe Adası (Antarktik Yarımadada) üzerindeki belirli bir konumdan kısa süreli TEC kullanılarak, NeQuick2 modeli kullanılarak oluşturulan TEC tahminleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın ana sonuçları şu şekilde özetlenebilir: Elektron yoğunluğu, iyonosferik levha kalınlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Jeomanyetik fırtınanın olmadığı, Kp ve Dst indekslerinin normal değerde olduğu, F10,7 cm akısının yüksek olmadığı ancak AE indeks değerinin 500 nT ve üzerinde olduğu günlerde, iyonosferik levha kalınlığının değişimi görülmektedir. GNSS ve NeQuick2 modeli çıktısına bakıldığında günlük TEC minimum değerleri büyük oranda örtüşmektedir. Dalgacık analizi sonuçlarına bakıldığında, sırasıyla 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerinde GNSS ve NeQuick2 modeli küçük ölçekte benzer güç spektrumunu göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu, kutup bölgeleri üzerinde iyonosferik uzaktan algılama gözlemleri kullanılarak iyonosferik tahmin modelinin geliştirilmesi için iyonosferik TEC değişkenliğinin temel girdilerinin sağlanmasında faydalı olacaktır. Ek olarak, 2021'deki tüm güneş etkinliklerini kapsayan bir yıllık bir çalışma yapılması gerektiğini ve standart sapma ve dalgacık (wavelet) analizi yöntemlerini uygulayarak bu eğilimler arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı incelenmesi önerilir.

## TEŞEKKÜR

Projede kullanılan GNSS verileri, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 118Y322 numaralı projeden alınmıştır.

## KAYNAKLAR

- Canyılmaz, M., Akdoğan, T., ve Güzel, E. (2016). Ölçülen ve IRI Modeli ile Elde Edilen İyonküre Kritik Frekansının (foF2) Karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1).
- Dabbakuti, J. K., ve Ratnam, D. V. (2016). Characterization of ionospheric variability in TEC using EOF and wavelets over low-latitude GNSS stations, *Advances in Space Research*, 57(12), 2427-2443.
- Huang, H., Liu, L., Chen, Y., Le, H., Wan, W. (2016), A global picture of ionospheric slab thickness derived from GIM TEC and COSMIC radio occultation observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 867– 880, doi:10.1002/2015JA021964.
- Jin, S., Cho, J. H., ve Park, J. U. (2007). Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(15), 1864-1870.
- Kucuk, F. A., vd., (2022). Estimating Ionospheric Slab Thickness for the One Month Period of December 2021 in Horseshoe Island, western Antarctica (Özet), *ATMOS 22, İTÜ*, İstanbul. Erişim adresi: <https://www.atmosfer.itu.edu.tr/atmos2022/abstracts/>.
- Liu, J. Y., Lin, C. H., Chen, Y. I., Lin, Y. C., Fang, T. W., Chen, C. H., Chen, Y. C., and Hwang, J. J. (2006). Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content, *J. Geophys. Res.*, 111, A05308, doi:10.1029/2005JA011306.
- Nava, B., Radicella, S. M. ve Azpilicueta, F. (2011). Data ingestion into NeQuick 2. *Radio Science*, 46(06), 1-8.
- Nava, B., Radicella, S. M., Leitinger, R., ve Coïsson, P. (2006). A near-real-time model-assisted ionosphere electron density retrieval method, *Radio Science*, 41(06), 1-8.

- Osanyin, T. O., Candido, C. M. N., Becker-Guedes, F., Migoya-Orue, Y., Habarulema, J. B., Obafaye, A. A., ... ve Moraes-Santos, S. P. (2023). Performance of a locally adapted NeQuick-2 model during high solar activity over the Brazilian equatorial and low-latitude region, *Advances in Space Research*, 72(12), 5520-5538.
- Pignalberi, A., Pietrella, M., Pezzopane, M. et al. (2022). The Ionospheric Equivalent Slab Thickness: A Review Supported by a Global Climatological Study Over Two Solar Cycles. *Space Sci Rev* 218, 37. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00909-z>
- Priyadarshi, S., Zhang, Q. H. ve Wang, Y. (2021). Geomagnetic storm-time scintillation study in Antarctica-A comparison of model and observation, *Polar Science*, 28, 100634.
- Reinisch, B.W., Galkin, I.A. (2011). Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO), *Earth Planet Sp*, 63, 377-381 <https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001>
- Selbesoğlu, M. O., Yavaşoğlu, H. H., Karabulut, M. F., Yavaşoğlu, H. A., Özcan, H. G., Oktar, Ö., Özsoy, B., Karaman, H., Kamaşak, M. E. ve Gülal, V. E. (2021). Antarktika'da Küresel İklim Değişikliği İzleme için GNSS İstasyon Tasarımı: TUR1 ve TUR2 GNSS İstasyonlarının 4. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'nde Antarktika Horseshoe Adası'na Kurulumu, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (6), 1353-1365. DOI: 10.35414/akufemubid.946282
- Şentürk, E. (2021). Küresel İyonosfer Haritalarının Türkiye'deki Performansının GNSS Verileriyle İstatistiksel Olarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 247-255. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236721>
- Titheridge, J. E. (1973). The slab thickness of the mid-latitude ionosphere, *Planetary and Space Science*, 21.10, 1775-1793.
- Usoskin, I.G. (2017). A history of solar activity over millennia, *Living Rev Sol Phys*, 14, 3 <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Web 1: Zhivetiev,I., <https://github.com/gnss-lab/gnss-tec>, 2019.
- Web 2: [www.spaceweatherlive.com](http://www.spaceweatherlive.com)