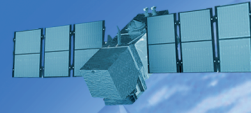


[Cilt/Volume:09] [Sayı/Issue:01] [Mayıs/May 2022] [Dergi No/Journal No.:115] [ISSN: 2147-1339] [e-ISSN: 2667-8519]

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON DERGİSİ

JOURNAL OF GEODESY AND GEOINFORMATION



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

UCTEA Chamber of Survey and Cadastre Engineers



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

Yayıncı / Publisher

TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası
UCTEA Chamber of Surveying and Cadastre Engineers, Turkey

Yayın İdare Merkezi / Head Office

Mustafa Kemal Mahallesi 2129 Sk. No:1/7-8-9 06530 Çankaya, ANKARA, TURKEY

Tel: +90 (312) 2325777 • Fax: +90 (312) 2308574

jjd@hkmo.org.tr ; hkmojjd@gmail.com

dergipark.org.tr/hkmojjd

Tasarım ve Mizanpaj / Design & Layout

Önder Olgun Bökü

Baskı & Cilt / Printing & Binding

Elma Teknik Basım

www.elmateknikbasim.com/

Tel: +90 312 229 92 65

Basım Tarihi / Publication Date: Mayıs 2022 / May 2022

Baskı Adedi / Circulation: 2000

Hakemli bir dergidir. / A Peer - reviewed journal.

Yaygın ve süreli yayındır. / A widely distributed periodical.

Yılda iki defa yayımlanır (Mayıs - Kasım) / Published semiannually (May - November).

[Cilt/Volume:09] [Sayı/Issue:01] [Mayıs/May 2022] [Dergi No/Journal No.:115]

[ISSN: 2147-1339] [e-ISSN: 2667-8519]

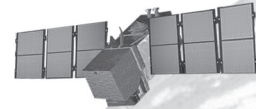


UCTEA

Chamber of Survey and Cadastre Engineers

JEODEZİ VE JEOİNFORMASYON DERGİSİ

JOURNAL OF
GEODESY AND GEOINFORMATION



TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası

UCTEA Chamber of Survey and Cadastre Engineers

JEODEZİ VE JOURNAL OF GEODESY

EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul

EDİTÖR YARDIMCILARI / CO-EDITORS

Prof. Dr. Tarık TÜRK
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
Sivas

Prof. Dr. Nursu TUNALIOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi
İstanbul

EDİTÖR KURULU / EDITORIAL BOARD

Prof. Dr. Arif Çağdaş AYDINOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli

Prof. Dr. Atınç PIRTI
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Aydın ÜSTÜN
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

Prof. Dr. Cemal Özer YIĞIT
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli

Prof. Dr. Cengizhan İPBÜKER
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Çetin CÖMERT
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Prof. Dr. Çetin MEKİK
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

Prof. Dr. Devrim AKÇA
Işık Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT
Konya Teknik Üniversitesi, Konya

Prof. Dr. Erol KÖKTÜRK
Okan Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Faik Ahmet SESLİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun

Prof. Dr. Ferruh YILDIZ
Konya Teknik Üniversitesi, Konya

Prof. Dr. Halil AKINCI
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin

Prof. Dr. Haluk ÖZENER
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Haluk KONAK
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

Prof. Dr. Hülya DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Hüseyin TOPAN
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

Prof. Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ
Konya Teknik Üniversitesi, Konya

Prof. Dr. İsmail Rakıp KARAŞ
Karabük Üniversitesi, Karabük

Prof. Dr. Mahmut Onur KARSLIOĞLU
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Prof. Dr. Metin SOYCAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Mualla YALÇINKAYA
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Prof. Dr. Murat UYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar

Prof. Dr. Mustafa TÜRKER
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

Prof. Dr. Naci YASTIKLI
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Nebiye MUSAOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Necla ULUĞTEKİN
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR
Ankara Üniversitesi, Ankara

Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Sebahattin BEKTAŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

Prof. Dr. Şenol Hakan KUTOĞLU
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak

Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU
Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli

Prof. Dr. Uğur DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Prof. Dr. Volkan ÇAĞDAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Ahmet Özgür DOĞRU
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin

Doç. Dr. Caner GÜNEY
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Emine Tanır KAYIKÇI
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

Doç. Dr. Melis UZAR, Yıldız Teknik Üniversitesi,
İstanbul

Doç. Dr. M. Tefvik ÖZLÜDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Nusret DEMİR
Akdeniz Üniversitesi, Antalya

Doç. Dr. Özgün AKÇAY
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale

Doç. Dr. Saygın ABDİKAN
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

Doç. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU
Hacettepe Üniversitesi, Ankara

Doç. Dr. Taylan ÖCALAN
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Doç. Dr. Uğur AVDAN
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir

Dr. Öğr. Üyesi Emin Özgür AVŞAR
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Güven KOÇAK
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir

Dr. Öğr. Üyesi Utkan Mustafa DURDAĞ
Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin

SAHİBİ (HKMO adına)
OWNER (on behalf of CSCE)
Ali İPEK
HKMO, Ankara

YAZI İŞLERİ MÜDÜRÜ
MANAGING EDITOR
Timur Bilinç BATUR
HKMO, Ankara

YAYIN KURULU / PUBLICATION BOARD

Bahattin ERDOĞAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Nursu TUNALIOĞLU, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Tarık TÜRK, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas

Taylan ÖCALAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

Onur SEVENCAN, HKMO, Ankara

JEOİNFORMASYON DERGİSİ AND GEOINFORMATION

Dergi Hakkında

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'na ait altı ayda bir yayımlanan (Mayıs ve Kasım ayları), hakemli, açık erişimli, süreli, özgün makalelerin yer aldığı bilimsel bir dergidir.

Amaç ve Kapsam

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, jeodezi, jeoinformasyon bilimleri ve teknolojileri konularında geniş kapsamlı araştırma alanlarını içermektedir. Geleneksel çalışma alanlarının yanında, yer bilimleri, yere yönelik uzay bilimleri ve ilişkili disiplinler arası çalışmalara da dergide yer verilmektedir.

Dergide en az iki bilim insanı veya araştırmacı tarafından hakem değerlendirmesinden geçmiş, aşağıda listelenen alanlarda Türkçe veya İngilizce makaleler yayımlanmaktadır.

- Ölçme ve Algılama Sistemleri
- Matematiksel, Fiziksel, Uzay ve Mühendislik Jeodezisi
- Yer Bilimleri
- Uzaktan Algılama
- Fotogrametri
- Yere Yönelik Uzay Bilimleri
- Kartografya
- Coğrafi Bilgi Sistem ve Teknolojileri
- Arazi Yönetimi
- Yazılım Geliştirme

Makale Gönderme

Makale gönderme, değerlendirme ve düzenleme süreçleri <https://dergipark.org.tr/tr/pub/hkmojjd> sistemi üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Telif Hakkı Bildirimi

Jeodezi ve Jeoinformasyon dergisi ücretsiz ve açık erişimli bir dergidir. Uygun şekilde kaynak göstermek koşulu ile makalenin herhangi bir bölümünün araştırma, çalışma, ders veya bilimsel ve teknik dokümanlarda kullanımı ücretsizdir. Ticari amaçla kopyalanması ve kullanımı TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası'ndan alınacak özel izne tabidir.

Yayın Etiği

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi bünyesindeki tüm yayınlar için yayın etiğini en yüksek standartlarda uygulamayı amaçlar ve "The Committee on Publication Ethics (COPE)" tarafından ortaya konulan kural ve ilkelere uymayı taahhüt eder.

About the Journal

Journal of Geodesy and Geoinformation is a peer-reviewed, semiannual (May and November), open access journal, which covers original scientific manuscripts, published by UCTEA Chamber of Surveying and Cadastre Engineers, Turkey.

Aim and Scopes

Journal of Geodesy and Geoinformation covers a broad range of research topics in geodetic and geoinformation sciences and technologies. Besides the traditional areas, it also includes study fields concerned with the earth sciences, earth-oriented space sciences and related interdisciplinary subjects.

The journal publishes peer-reviewed papers in the fields listed below in both English and Turkish, which are reviewed by at least two scientists and researchers.

- Surveying and Sensoric
- Mathematical, Physical, Space and Engineering Geodesy
- Earth Sciences
- Remote Sensing
- Photogrammetry
- Earth Oriented Space Sciences
- Cartography
- Geographical Information Systems and Technologies
- Land Management
- Software Development

Submission of Manuscript

Manuscript submission, review and editing processes are available on <https://dergipark.org.tr/en/pub/hkmojjd>

Copyright Information

Journal of Geodesy and Geoinformation is an open access and free of charge journal. There is no charge for use of any part of this publication in research, study, teaching or republications in scientific and technical documents, but the materials must be cited appropriately. Use and reproduction for commercial purposes requires special permission from Chamber of Surveying and Cadastre Engineers.

Publication Ethics

Journal of Geodesy and Geoinformation aims to apply high quality ethical standards for all publications and commits to obey the rules and principles of "The Committee on Publication Ethics (COPE)".

İÇİNDEKİLER

CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Toprak neminin yarı kurak alanlarda çok zamanlı RADARSAT-2 verileri ile incelenmesi
Analysis of soil moisture in semi-arid areas with multi-temporal RADARSAT-2 data..... 1-11
Sevinç MADENOĞLU, Hesna ÖZCAN, Murat Remzi PEKER, Melis Özge PINAR, Suat AKGÜL, Mehmet KEÇECİ, Tülay TUNÇAY, Mahmut Hilmi SEÇMEN, Ali KOÇ, Mustafa ÜSTÜNER, Alihsan ŞEKERTEKİN, Saygın ABDİKAN, Mustafa Tolga ESETLİLİ, Aynur ŞENSOY ŞORMAN, Şinasi KAYA, Günay ERPUL, Füsun BALIK ŞANLI
- ITRF96-ED50 Transformasyonu: Radyal esaslı enterpolasyon ve küresel harmonik modelleme
ITRF96-ED50 Conversion: Radial basis interpolation and modelling with spherical harmonics 12-23
İlke DENİZ, Şenol Hakan KUTOĞLU, Rasim DENİZ
- Kentsel teknik altyapı tesislerine yönelik uluslararası coğrafi veri modellerinin analizi
An analysis of international geospatial information models for urban utility networks 24-46
Azer İLGAR, Volkan ÇAĞDAŞ
- Sentinel-2 görüntüleri ve ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verilerinin kombinasyonu ile batimetri haritası üretilebilirliğinin araştırılması
Investigation on the generation of bathymetric maps by combining Sentinel-2 imagery and ICESat-2 ATL03 photon height data..... 47-58
Mehmet Güven KOÇAK
- En uygun rüzgâr enerji santrali yerlerinin coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi: Kocaeli ili örneği
Determination of the most suitable wind power plant locations with geographical information systems: Kocaeli province example 59-79
Serdar EKİZ, Ahmet ŞİRİN, Arzu ERENER

Derleme/Review

- Türkiye’de ulusal ve yerel sürekli gözlem yapan sabit GNSS istasyonları ağlarının mevcut durumu, standartlar ve farklı ağların entegrasyonu
Current situation of national and local CORS networks in Turkey, standards and their integration. 80-94
Ömer GÖKDAŞ, Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR

Toprak neminin yarı kurak alanlarda çok zamanlı RADARSAT-2 verileri ile incelenmesi

Sevinç Madenoğlu^{1*}, Hesna Özcan¹, Murat Remzi Peker², Melis Özge Pınar³, Suat Akgül², Mehmet Keçeci², Tülay Tunçay², Mahmut Hilmi Seçmen², Ali Koç⁴, Mustafa Üstüner⁵, Aliihsan Şekertekin⁶, Saygın Abdikan⁷, Mustafa Tolga Esetlili⁸, Aynur Şensoy Şorman⁹, Şinasi Kaya¹⁰, Günay Erpul¹¹, Füsün Balık Şanlı¹²

¹T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

²T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Toprak Gübre ve Su Kaynakları Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

³T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü, Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, Eskişehir, Türkiye.

⁴T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

⁵Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye.

⁶Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Ceyhan, Adana, Türkiye.

⁷Hacettepe Üniversitesi, Beytepe Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara, Türkiye.

⁸Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Bornova, İzmir, Türkiye.

⁹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye.

¹⁰İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, İstanbul, Türkiye.

¹¹Ankara Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Altındağ, Ankara, Türkiye.

¹²Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye.

Öz: Toprak nem içeriği yeryüzünde enerji değişimi ve su döngüsü açısından çok önemli bir faktördür ve doğal risklerin değerlendirilmesi, hidroloji, ekoloji, tarım ve iklim bilimi gibi pek çok alanda büyük etkiye sahiptir. Toprak nem özellikle arazi kullanımlarında konumsal ve zamansal olarak çok fazla değişerek çeşitli çevresel ve ekolojik sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, toprak nem içeriğinin konumsal değişiminin geniş ölçeklerde incelenmesi önemli bir araştırma konusudur. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) algılayıcıları toprak nemine duyarlı oldukları ve geniş alanları kapsadıkları için toprak neminin tespit edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğü Gözlu Tarım İşletmesi'nde seçilen buğday ekili ve nadasa bırakılmış tarlaların toprak nem içeriğinin konumsal ve zamansal değişiminin tam polarimetrik RADARSAT-2 görüntüleri ile belirlenebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. 2016 yılı Mart ve Ekim ayları arasında yapılan aylık arazi ölçümlerinden elde edilen yersel ölçüm değerleri SAR gerisaçılım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, doğrudan geri saçılım ile nem değerleri arasında -0.65 ile 0.67 arasında değişen negatif ve pozitif korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Toprak nem için ekili alanda buğdayın büyüme evresi olan Mayıs-Haziran döneminde daha yüksek korelasyon belirlenmiş olup, her iki alan için en iyi sonuç VV polarimetrik verisi ile elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Toprak nem, Zamansal analiz, SAR, RADARSAT-2

Analysis of soil moisture in semi-arid areas with multi-temporal RADARSAT-2 data

Abstract: Soil moisture content is a very important factor in terms of energy exchange and water cycle on Earth and has a great impact in many areas regarding assessment of natural risks, hydrology, ecology, agriculture, and climate science. Soil moisture can greatly change spatially and temporally, especially depending on land use changes, and the changing soil moisture may cause various environmental and ecological problems. In this respect, it is an important research subject to examine the spatial change of soil moisture content on large scales. Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors play an important role in detecting soil moisture because they are sensitive to soil moisture and they cover large areas. In this study, it was aimed to investigate the determination of the spatial and temporal variation of soil moisture content using fully polarimetric RADARSAT-2 images in wheat cultivated field and fallow land located in The General Directorate of Agricultural Enterprises Gözlu Agricultural Enterprise. The in-situ measurements obtained monthly from field surveys between March and October 2016 were compared with the backscatter values of SAR images. As a result of the study, negative and positive correlation coefficients varying from -0.65 to 0.67 were obtained between backscatter values and in-situ soil moisture values. The highest correlations for soil moisture were obtained in the cultivated area during the May-June period, which is the growing stage of wheat, and the best results for both areas were determined with VV polarimetric data.

Keywords: Soil moisture, Temporal analysis, SAR, RADARSAT-2

1. Giriş

Dünyanın karşı karşıya olduğu en önemli problemlerden biri küresel ısınma ve buna bağlı iklim değişimidir. Küresel ısınmaya bağlı iklim değişikliğinin, kara ve deniz buzullarının erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, iklim kuşaklarının yer değiştirmesi, ani taşkınların ve sellerin daha sık oluşması ve etkilerinin kuvvetlenmesi, kuraklık, çölleşme gibi insan yaşamını, sosyoekonomik sektörleri ve ekolojik sistemleri doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyebilecek önemli sonuçlarının olacağı öngörülmektedir (IPCC, 2001; Sertel, 2008; Sertel & Örmeci, 2009).

Kuraklık Türkiye’de en az anlaşılan ve aynı zamanda en çok zarar veren doğal afetlerden biridir. İklimin doğal bir parçasıdır, ancak raslantısal olarak ve seyrek bir şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Kuraklık aynı zamanda iklimin su kaynaklarını, tarımı ve tüm canlıları etkileyen bir şeklidir ve yarı kurak bir iklim kuşağında yeralan ülkemizin kuraklığın şiddetini yakın bir gelecekte bugünkünden çok daha fazla hissedebileceği aşikardır. Bu durumun en belirgin göstergesi ise küresel iklim değişimi sonucunda, ülkemizde de yağışların alansal dağılımının, şiddetinin ve süresinin değişiyor olmasıdır (Demir, Kılıç, Coşkun, & Sümer, 2008). Bunun sonucunda da ülkemizde buharlaşma artmakta, yağış düzeni değişmekte, toprak nemi ve kar örtüsü azalmakta, şiddetli yağışların sıklığı artmakta, akışlar ve akifer beslenmesinde azalmalar olmakta, şehirlerde ani seller ve kıyasal alanlarda deniz suyu girişi artmakta ve barajlarda daha fazla buharlaşmayla kayıplar olmaktadır (Kadioğlu, 2008; Kapluhan, 2013; Türkeş, 2007). Kuraklık; normalin altında yağış, düşük toprak nemi, sıcak kuru hava gibi birçok faktörün bileşiminin bir sonucudur. Bunun için sıcaklık, yağış, yüzey akışı, toprak nemi gibi ana iklimsel ve hidrolojik değişkenler düzenli olarak izlenmeli ve normal değerlerden olan sapmaların trendi gözlenmelidir.

Ülkemizde, değişik kuraklık endeksleri hazırlayıp, yeraltı suyu, akarsu ve göllerdeki su miktarını, toprak nemi ve uzun vadeli yağış tahminlerini bir elde toplayıp değerlendirebilen herhangi bir kurum veya kuruluş bulunmamaktadır. Dolayısıyla kuraklığın gelişimini, günlük/aylık olarak takip ederek, kurak ve nemli alanların ve bunların şiddetinin yerel dağılımı hakkında doğru ve zamanında bilgi sahibi olunamamaktadır. Ülkemizde şu ana kadar çeşitli kurum ve kuruluşlarca bazı alanlarda sıcaklık, yağış ve akım ölçümü yapılmış olmasına karşın diğer bir önemli kuraklık parametresi olan toprak nemine ilişkin düzenli ve sürekli bir izleme çalışması bulunmamaktadır (Kadioğlu, 2008, 2012).

Yüzey toprağının nem içeriği; atmosfer ve toprak yüzeyi arasında enerji transferi ile su dolaşımını etkileyen hidrolojik dinamiklerdeki çok önemli değişkenlerden birini oluşturmaktadır. Toprak neminin konumsal ve zamansal değişiminin doğru tahmini çevre ile ilgili pek çok çalışma açısından önem taşımaktadır. Uydular ile yapılan uzaktan algılama bilimindeki son teknolojik gelişmeler, birçok uzaktan algılama teknolojisi ile (zayıf ve güçlü yönleriyle) toprak neminin ölçülebildiğini göstermektedir (Baghdadi, Aubert, & Zribi, 2011; Wang & Qu, 2009; Zribi, Baghdadi, Holah, & Fafin, 2005). Özellikle yüzey toprak nemi, mikrodalga uzaktan algılama teknolojisi ile uyumlu olan, bir dizi teorik, deneysel veya yarı deneysel model kullanılarak tahmin edilebilmektedir (Baghdadi, vd., 2011; Bousbih vd., 2018; Dubois, van Zyl, & Engman, 1995; Huang vd., 2019; Oh, 2004; Şekertekin, Marangoz, & Abdikan, 2020; Xie vd., 2017; Zribi vd., 2005).

Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) algılayıcılara sahip sistemler, yeryüzü gözlemleri için en çok kullanılan mikrodalga uzaktan algılama sistemleridir. Pek çok çalışma X-bant (Baghdadi, Zribi, Loumagne, Ansart, & Anguela, 2008; Zribi vd., 2011), C-bant (Baghdadi, Gaultier, & King, 2002; Kurucu, Şanlı, Esetlili, Bolca, & Göksel, 2009; Moran vd., 2012; Şekertekin, Marangoz, & Abdikan, 2018) ve L-bant (Şekertekin vd., 2020) gibi farklı dalga boylarına sahip uyduların görüntülerini kullanarak yüzey toprak nemini elde etmiştir (Şekertekin vd., 2018).

Baghdadi vd. (2002), çalışmalarında çıplak bir arazi üzerinde ERS ve RADARSAT verileri kullanarak toprak nemi ve yüzey pürüzlülüğünü belirlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmada, Integral Equation Modeli (IEM) ile oluşturulan simüle edilmiş bir

veri setine sahip yapay sinir ağları kullanılmıştır. Bu ağlar, 3 radar konfigürasyonunun (VV 23°, HH 39° ve HH 47°) geri saçılım değerleri ile araziden elde edilmiş geniş bir yüzey pürüzlülüğü ve toprak nemi veri setine uygulanmıştır. İkili ve üçlü radar görüntüsü konfigürasyonuna dayanan yaklaşımlar incelenmiş ve test edilmiştir. Üçlü konfigürasyon biraz daha doğru sonuçlar vermiştir. Toprak nemi ve yüzey pürüzlülüğünün karesel ortalama hataları sırasıyla, yaklaşık %7.6 ve 0.47 cm bulunmuştur.

Baghdadi vd. (2008) tarafından yürütölen bir başka çalışmada ise, TerraSAR-X verisinin bitki örtüsü olmayan tarım arazilerinde toprak yüzey parametrelerine duyarlılığı araştırılmıştır. Bu çalışmada, HH polarizasyonda farklı geliş açılarında (26°, 28°, 50°, 52°) alınmış görüntüler kullanılmıştır ve yüksek geliş açısına sahip görüntülerin (50°–52°) yüzey pürüzlülüğüne daha duyarlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca duyarlılığın HH polarizasyona sahip L-bant PALSAR (38°)' da fazla olduğu da gözlenmiştir. Bununla birlikte VV ve HH polarizasyonlarda alınan C-bant ASAR görüntüsünde (23°) ise VV ve HH polarizasyon sonuçları arasında önemli bir fark olmadığı belirtilmiştir.

Moran vd. (2012) tam polarimetrik (HH+VV+HV+VH) RADARSAT-2 (23° - 41°) görüntüsü kullanarak buğday, arpa, yulaf, mısır ve soğan gibi bitki örtüsü ile kaplı alanlarda toprak parametrelerini araştırmışlardır. Tüm ürünler için HV polarizasyona sahip görüntüde geri saçılım değerinin daha tutarlı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Işın geliş açısının değişimine bağlı olarak ürün deseninin ve toprak koşullarının en duyarlı olduğu polarizasyon da HV görüntüsüdür. HV görüntüsü dışında da HH polarizasyonun toprak nemi değişiminin belirlenmesinde duyarlı olduğu belirtilmiştir.

şekertekin vd. (2020) çalışmalarında ALOS-2 ve Sentinel-1 verilerini kullanarak SAR görüntülerinin yüzey toprak nemi ile olan ilişkisini incelemiştir. Çalışma alanında 0-5 cm derinlikte toprak örnekleri alınarak nem değerleri gravimetrik yöntem ile elde edilmiştir. ALOS-2 verisinin dalga boyunun daha uzun olmasından dolayı C-banda göre yüzey pürüzlülüğüne daha az duyarlı olduğu, polarizasyonlar karşılaştırıldığında ise VH ve HH polarizasyonlu görüntülerin daha duyarlı olduğu belirtilmiştir. Sentinel-1 sonuçlarında ise, VH görüntüsünün VV görüntüsüne göre daha duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Açık alanlar için Dubois (**Dubois vd., 1995**) ve Oh (**Oh, 2004**) modelleri kullanılarak nem tahmini çalışması uygulanmıştır. Dubois modeli ile yapılan analizlerde Sentinel-1 sonuçlarının ALOS sonuçlarından daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir. Oh modeli sadece ALOS verisine uygulanabilmektedir, ancak başarılı sonuçlar vermemiştir. Bu nedenle ayrıca toprak nemi, geri saçılım, lokal geliş açısı, pürüzlölük ve dielektrik katsayısı kullanılarak deneysel model geliştirilmiştir. Modelde dielektrik katsayısının olmadığı durumlarda C-bant Sentinel-1 verisi ile en iyi R² değeri 0.77 olarak elde edilmiştir.

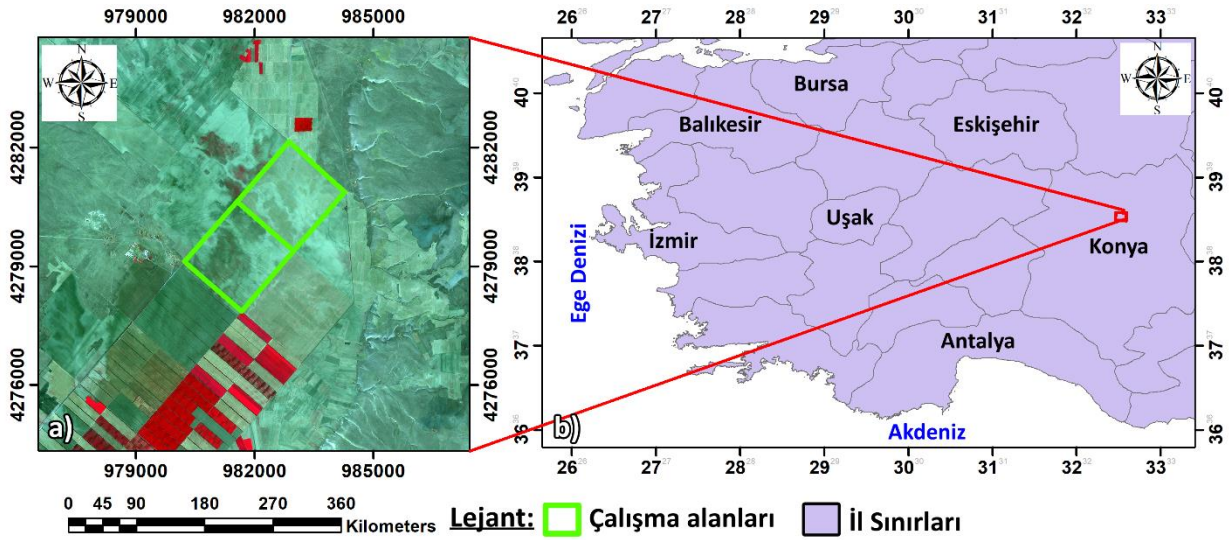
Bu çalışmada, Tarım İşletmeleri Genel Müdürlüğü (TİGEM) Gözlü Tarım İşletmesi'nde seçilen ekili ve ekili olmayan alanlarda mikrodalga uydu görüntüleri ile birçoğ hidroloji modeli ve verim tahmininde girdi olarak yer alan toprak neminin belirlenebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla çok zamanlı ve tam polarimetrik RADARSAT-2 uydu görüntülerinin alım tarihleri ile eş zamanlı olarak arazi ölçümleri yapılmış olup, elde edilen değerler ile uydu görüntülerinin geri saçılım değerleri istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır.

2. Çalışma Alanı ve Materyal

2.1 Çalışma Alanı

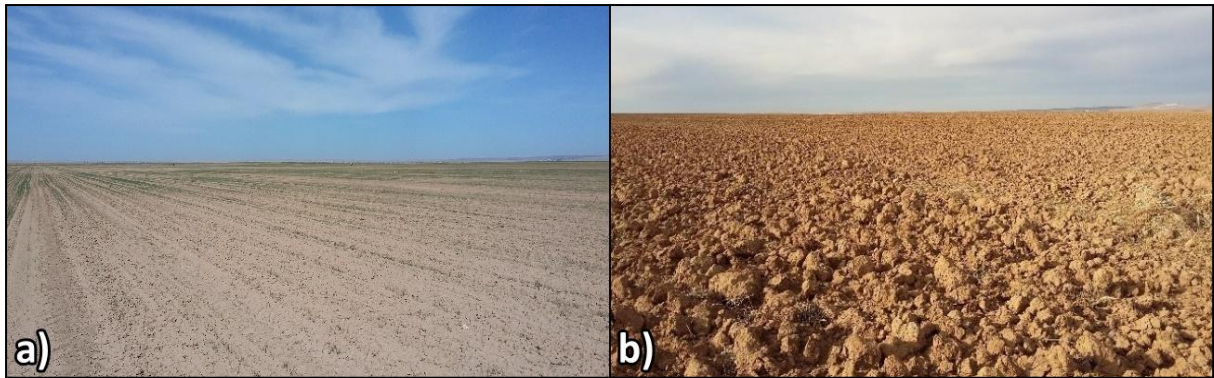
Çalışma, Konya ili Sarayönü ilçesi sınırları içerisinde yer alan TİGEM Gözlü Tarım İşletmesi'nde seçilen bir buğday ekili ve bir nadas parselinde yürütölmüştür (şekil 1). Çalışma alanı olarak seçilen Gözlü Tarım İşletmesi, Konya'ya 78 km ve Sarayönü'ne 28 km uzaklıkta bulunmaktadır. İşletme, 1940 yılında, Gözlü Gurup Amirliği Ziraat Kombinası adı altında Açık Tarım İşletmesi olarak kurulmuştur. 1950 yılında Devlet Üretme Çiftliği olan işletme, 1984 yılından bu yana TİGEM

bünyesinde faaliyetlerini sürdürmektedir. İşletmede 20 yıllık ekim üzerine düşen yağış ortalaması 326.1 mm'dir. İşletmenin bulunduğu bölgede kış mevsimi soğuk ve yağışlı, yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir.



Şekil 1: Çalışma alanının gösterimi: a) Çalışma alanlarının 31 Temmuz 2016 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüsü üzerinde Yakın Kıvılcımsız-Kırmızı-Yeşil band kombinasyonunda gösterimi, b) Çalışma alanının il sınırları içinde gösterimi.

Karasal iklim özelliklerini taşıyan bölgede yağışlar genellikle kış ve ilkbahar aylarında alınmaktadır. Her yıl mart ve nisan aylarında esen rüzgar hızı saatte bazen 100–120 km'ye ulaşmakta ve bölgede rüzgar erozyonu sorunu bulunmaktadır. Bu yüzden işletmede 225 km orman şeridi tesis edilmiştir. Bu araştırmanın çalışma planına göre, yapılan arazi çalışmaları ile toprak nemi ölçümleri 2016 yılında gerçekleştirilmiştir. Yersel toprak nemi ölçümleri 2 km x 2 km boyutlarına sahip olan buğday ekili ve nadas parsellerinde 110'ar noktada 200 m ara ile grid sisteminde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında deneme yılında ekili parselde kuru buğday tarımı yapılmıştır. Şekil 2'de çalışma alanlarının arazi çalışmasında çekilmiş görüntüleri verilmektedir.



Şekil 2: Çalışma alanları a) Buğday ekili parsel, b) Nadas parseli

2.2 SAR Uydu Görüntüsünün Özellikleri

Gerçekleştirilen arazi çalışmaları ile eş zamanlı olarak çalışma alanının RADARSAT-2 uydu görüntüleri alınmıştır. C-banda sahip RADARSAT-2 uydusuna ait görüntüler tek bakışlı karmaşık (Single Look Complex, SLC) görüntü formatında ve tam polarimetrik alım modunda temin edilmiştir. Uyduya ait genel özellikler ve çalışmada kullanılan veri tarihleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: RADARSAT-2 uydusunun görüntü özellikleri ve yersel ölçüm ile eş zamanlı alınan uydu görüntülerinin tarihleri

Yörünge Yönü	Alçalan
Alım Modu	FQ21
Frekans	C-band (5.4 GHz)
Polarizasyon	HH+HV+VH+VV
Çözünürlük	4.7 m x 5.1 m (Menzil x Azimut)
Geliş Açısı	40°
Veri Alma Tarihleri	09/03/2016
	24/04/2016
	20/05/2016
	14/06/2016
	01/07/2016
	31/07/2016
	24/08/2016
	11/10/2016

3. Yöntem

3.1 Nem Ölçümü

Çalışma kapsamında 9 Mart, 24 Nisan, 20 Mayıs, 13 Haziran, 7 Temmuz, 31 Temmuz, 24 Ağustos ve 11 Ekim 2016 tarihlerinde daha önce belirlenen düz ve düze yakın eğimli buğday ekili ve nadas parsellerinde (Şekil 2) toprak nemi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, C-bandının penetrasyon kabiliyetinin yüzeyden 5 cm derinliğe kadar olması nedeniyle toprak nemi ölçümleri tüm çalışma tarihlerinde gravimetrik olarak 0-5 cm derinlikte yapılmıştır (Xie vd., 2017). Alınan yaş (nemli) toprak örnekleri tartılmış ve daha sonra 24 saat fırında kurutulmuştur. Kuruma işleminin ardından örnekler kuru ağırlığı elde etmek için yeniden tartılmış ve eşitlik (1) kullanılarak toprak nemi değerleri elde edilmiştir. Eşitlikte N_1 dara ile nemli toprağın ağırlığını, N_2 dara ile kuru toprağın ağırlığını ve N_0 dara ağırlığını temsil etmektedir.

$$N = \left(\frac{(N_1 - N_0) - (N_2 - N_0)}{(N_2 - N_0)} \right) \times 100 \quad (1)$$

3.2 SAR Verilerinin İşlenmesi

Öncelikle geri saçılım değerinin elde edilebilmesi için SAR verilerine ön işlem adımları uygulanmıştır. Bu işlemler Avrupa Uzay Ajansı'nın kullanıcılara ücretsiz olarak sunduğu Sentinel Application Platform (SNAP) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Birinci adım olarak SLC formatında alınmış görüntüler radyometrik kalibrasyon ile doğrusal geri saçılım (sigma nought) değerlerine dönüştürülmüştür (RADARSAT, 2000). Daha sonra 30 m geometrik çözünürlüğe sahip SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) sayısal yükseklik modeli kullanılarak topoğrafya düzeltmesi yapılmış ve görüntünün konumsal çözünürlüğü 10 m'ye yeniden örneklenmiştir. Son adımda ise doğrusal olan geri saçılım değerleri desibel (dB) değerine dönüştürülmüştür. Dönüşüm için aşağıdaki (2) ve (3) eşitlikleri kullanılmıştır.

Radar parlaklığı (β_j°) ve radar geri saçılım katsayısı (σ_j°) arasındaki ilişki;

$$\sigma_j^\circ = \beta_j^\circ + 10 \log_{10} \sin I_j \quad (2)$$

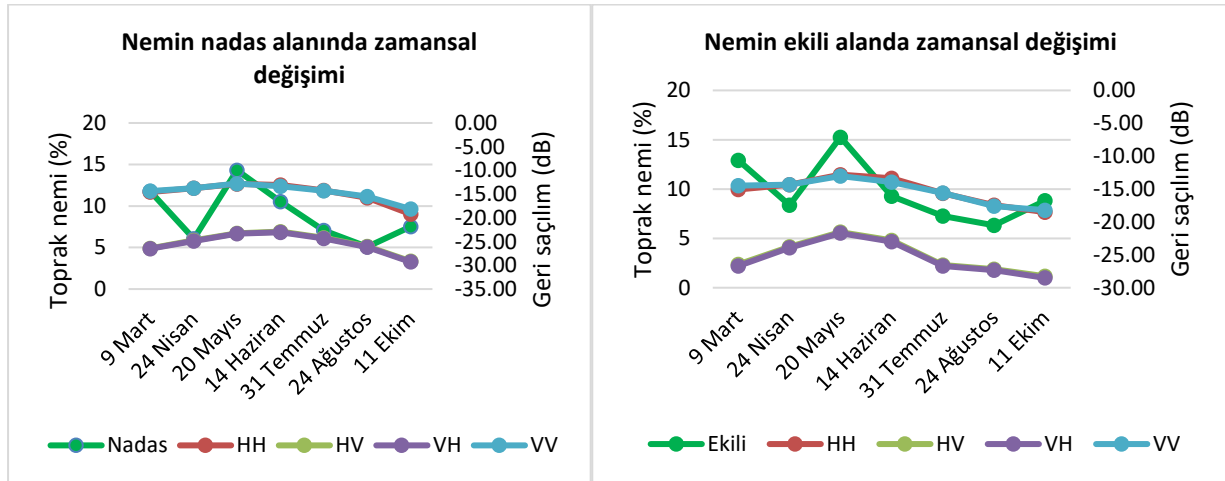
ile ifade edilir. Burada I_j , j. pikseldeki geliş açısıdır. β_j° , j. pikseldeki radar parlaklık değeri;

$$\beta_j^\circ = 20 \log_{10}(DN_j/A_j) \quad (3)$$

ile ifade edilir.

4. Değerlendirme ve Tartışma

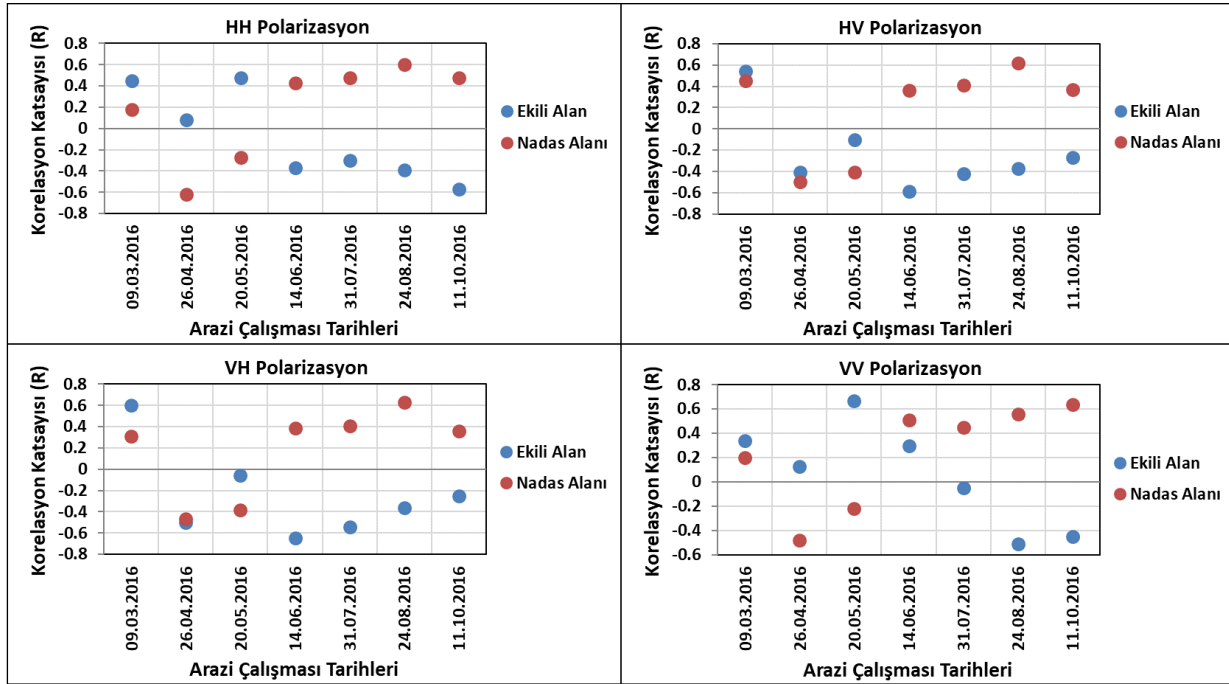
Nadas parselinde ve buğday ekili parselde 9 Mart 2016 ile 11 Ekim 2016 tarihleri arasında yapılan arazi çalışmalarında belirlenen ortalama nem içeriği ve her bir tarihteki geri saçılım değerlerine ait değişim Şekil 3'te verilmiştir. En yüksek nem içeriği her iki parselde de 20 Mayıs 2016 tarihli ölçümde belirlenmiştir ve genel olarak toprak nem içeriği her iki alanda da benzer eğilim göstermiştir. Arazi ölçümlerinden elde edilen nem verileri ile eş zamanlı alınan RADARSAT-2 görüntülerine ait geri saçılım değerleri arasında doğrusal regresyon analizi yapılarak Pearson Korelasyon Katsayıları (Pearson Correlation Coefficient, PCC) elde edilmiş ve her polarizasyon verisi için incelenmiştir (Şekil 4). En yüksek nem değerleri 20 Mayıs 2016 tarihinde nadas parselinde ortalama %14.49, buğday ekili parselde ortalama %15.37, en düşük değerler ise 24 Ağustos 2016 tarihinde nadas parselinde ortalama %5.75, buğday parselinde ise ortalama %6.31 olarak belirlenmiştir. Her bir alan için dört farklı polarizasyonda değerlendirme yapılmış ve en yüksek PCC değerini veren polarizasyondaki değer verilmiştir. Buna göre doğrudan geri saçılım ile nem değerleri arasında -0.65 ile 0.67 arasında değişen negatif ve pozitif korelasyon katsayıları elde edilmiştir. En yüksek negatif PCC değeri 14 Haziran 2016 tarihinde ekili alanda VH'de -0.65 olarak belirlenirken, en yüksek pozitif değer ise 20 Mayıs 2016 tarihinde ekili alanda VV'de 0.67 olarak belirlenmiştir. Nadasa bırakılan alanda ise değerler -0.62 (Nisan) ve 0.64 (Ekim) değerleri arasında değişmektedir. Her dört polarizasyonda da ekili alanda Haziran ayından itibaren korelasyon değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. Bitkinin gelişimi ile birlikte uydudan elde edilen geri saçılım değeri, bitki ve topraktan alınan geri saçılımların toplamına eşittir. Bu nedenle, burada bitkinin geri saçılımdaki etkisi görülmektedir. Nadasa bırakılan alanda da üçleme işleminin yapıldığı Haziran ayından itibaren PCC değerlerinde artış görülmektedir (Şekil 4).



Şekil 3: Nemin nadas ve ekili alanda zamansal değişimi

Bu konuda daha önce yapılan çalışmaların sonuçları, çalışmanın yürütüldüğü koşullar ve kullanılan metodolojilere bağlı olarak geniş bir aralıkta korelasyon değerleri elde edilebileceğini göstermiştir (Baghdadi vd., 2002; Chai vd., 2015; Chen vd., 2012; Kaleita, Tian, & Hirschi, 2005; Lievens & Verhoens, 2012; Rahman vd., 2008; Yang, Feng, Liu F., Liu J., & Sun, 2019; Yılmaz, 2008). Yang vd. (2019) RADARSAT-2 verilerini kullanarak çıplak arazide 0-5 cm derinlikten alınan ve gravimetrik ölçümle elde edilen nem değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada lineer geri saçılım değerleri yerine polarimetrik ürünler kullanılmıştır. Polarimetrik parametreler arttıkça lineer korelasyon sonucu elde edilen korelasyon sonuçlarının da

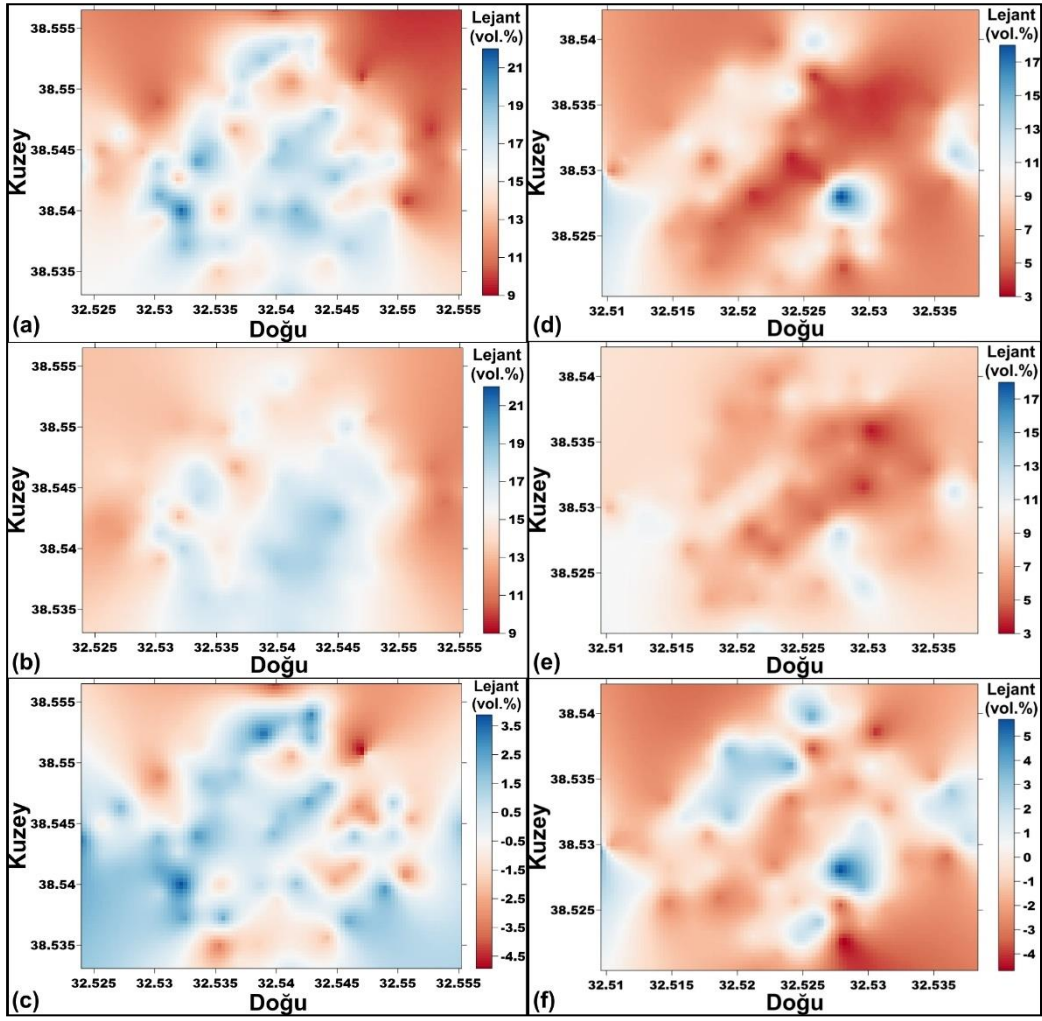
arttığı görülmüştür. Tek bir polarimetrik parametrenin korelasyon değeri 0.43 iken çoklu parametre ile bu değerin 0.68'e çıktığı belirlenmiştir. Ancak tek tarihli bir görüntünün tüm polarimetrik verileri incelendiğinde korelasyon katsayılarının çok daha düşük olduğu ve en iyi polarimetrenin VH (R=0.19) ile elde edildiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ise farklı tarihlerde alınan görüntüler ile korelasyonun değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4: Nem değerleri ile RADARSAT-2 görüntüleri arasındaki korelasyon değerleri

Ezzahar vd. (2020) C-bant Sentinel-1 verisi ile yaptıkları çalışmada üzerinde bitki olmayan boş arazide 5 cm derinlikten elde ettikleri nem değerlerini kullanmışlardır. Toprak nemi ve geri saçılım değerlerine ait regresyon değerleri incelendiğinde VV polarizasyona sahip görüntünün toprak neminin belirlenmesinde VH polarizasyona göre daha uygun olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde bu çalışmada da C-bant VV polarizasyona sahip görüntünün nadas parselinde en yüksek sonucu verdiği bulunmuştur. Holah, Baghdadi, Zribi, Bruand ve King (2005) toprak nemi ile çok zamanlı ve farklı geliş açısına sahip C-bant Envisat verisi arasındaki ilişkiyi incelemiş ve en iyi sonucun 34°-37° geliş açısına sahip HV verisi ($R^2=0.68$) ile elde edildiğini belirtmiştir. Ancak korelasyonun 40°-43° geliş açısına sahip veriler ile incelendiğinde hem HV ($R^2=0.33$) hem de HH ($R^2=0.21$) verileri için daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada ise 40° geliş açısına sahip C-bant RADARSAT-2 verileriyle daha yüksek ilişki kurulduğu tespit edilmiştir.

Chai vd. (2015) çayır alanında toprak neminin belirlenmesinde RADARSAT-2 verilerini kullanmışlardır. Çalışmada Dubois ve Chen modelleri kullanılmış ve toprak nemi kestirimi yapılmıştır. Uygulamada 2 görüntü kullanılmış ve bu görüntü alımları sırasında sırasıyla 33 ve 32 test alanı belirlenmiştir. Her test alanı için 100x100 m alanda 3 alım gerçekleştirilmiştir. Sadece iki polarimetri verisi olan HH ve VV görüntüleri kullanılarak elde edilen modellerden test alanları için en iyi R^2 değerleri sırasıyla 0.8 (Dubois) ve 0.75 (Chen) bulunmuştur. Çalışmada polarimetrik veriler ayrı ayrı incelenmemiş olup verilerin beraber ele alındığı modeller ele alınmıştır. Bu çalışmada ise tüm polarimetreler ayrı ayrı ele alınmış ve tek bir polarimetrik görüntü ile 0.65'in üzerinde korelasyon sağlanabileceği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, ekili alanda en yüksek korelasyonu 20 Mayıs 2016 tarihli VV polarimetrede elde edilmiş veri sağlarken, nadasa bırakılmış alanda 11 Ekim 2016 tarihli VV verisi sağlamıştır. Bu iki veri için Kriging yöntemi ile nem haritaları oluşturulmuş ve yersel ölçümlerden elde edilen değerlerden çıkarılarak alansal olarak hata değerleri elde edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: 20 Mayıs 2016 ekili alan için sırasıyla a) Yersel nem ölçümü, b) Tahmin edilen nem, c) Yersel ve tahmin edilen nem farkı. 11 Ekim 2016 tarihli nadas alan için sırasıyla d) Yersel nem ölçümü, e) Tahmin edilen nem, f) Yersel ve tahmin edilen nem farkı

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, Konya ili sınırları içerisinde yer alan TİGEM Gözlü Tarım İşletmesi içerisinde yer alan buğday ekili ve nadas parsellerinde 9 Mart 2016 ile 11 Ekim 2016 tarihleri arasında yaklaşık birer aylık aralıklar ile toprak neminin zamansal değişimi RADARSAT-2 SAR uydu görüntüleri ile belirlenmiştir. Hangi polarimetrik verinin daha iyi sonuç verdiğini belirlemek için dört polarimetrik (HH, HV, VH ve VV) veriye ait geri saçılım değerleri ile yersel veriler arasındaki korelasyon değerleri karşılaştırılmıştır. Toprak neminin en iyi belirlenebildiği dönemi belirlemek amacıyla zamansal bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Toprak nemi incelendiğinde ekili alan için buğdayın büyüme evresi olan mayıs-haziran döneminde daha yüksek korelasyon sağlandığı görülmüştür, en iyi sonuç VV polarimetrik verisi ile tespit edilmiştir. Benzer şekilde nadasa bırakılan alanda da en iyi sonuç VV polarimetrik verisi ile elde edilmiştir. VV polarimetrik verisine alternatif olarak ikinci sırada VH verisi yüksek değerler vermiştir.

SAR görüntüleriyle yapılan nem çalışmalarında sonucu etkileyen pek çok sistem parametresi ile birlikte hedef nesneye ait parametreler de yer almaktadır. Sonraki çalışmalarda polarimetrik verinin geri saçılım değerleri ile birlikte geri saçılım matrisi (SAR decomposition) bilgilerinin de kullanılarak farklı modellerle uygulanması düşünülmektedir. Bitkili alanlarda da bitkiye

ait yükseklik ve yüzey kaplama gibi parametrelerin de ele alındığı modellerin geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, optik ve mikrodalga görüntülerin birlikte kullanımı ile elde edilecek doğrulukların artacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Çalışmada Tarım ve Orman Bakanlığı Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü tarafından desteklenen TAGEM/TSKAD/14/A13/P05/03 nolu proje kapsamında elde edilen veriler kullanılmıştır. TAGEM'e ve proje ekibine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Yazar Katkısı

Sevinç Madenoğlu: Fikir, Tasarım, Literatür taraması, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Denetleme, Finansman, Yazım. **Hesna Özcan:** Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama. **Murat Remzi Peker:** Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama. **Melis Özge Pınar:** Tasarım, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Suat Akgül:** Tasarım, Denetleme, Finansman. **Mehmet Keçeci:** Veri toplama. **Tülay Tunçay:** Veri toplama. **Mahmut Hilmi Seçmen:** Veri toplama, Analiz. **Ali Koç:** Tasarım, Veri toplama. **Mustafa Üstüner:** Literatür taraması, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Alihsan Şekertekin:** Literatür taraması, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Saygın Abdikan:** Fikir, Tasarım, Literatür taraması, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Mustafa Tolga Esetlili:** Fikir, Tasarım, Literatür taraması, Veri toplama ve işleme. **Aynur Şensoy Şorman:** Fikir, Tasarım. **Şinasi Kaya:** Fikir, Tasarım. **Günay Erpul:** Fikir, Tasarım. **Fusun Balık Şanlı:** Fikir, Tasarım, Literatür taraması, Veri toplama ve işleme, Analiz ve yorumlama, Denetleme, Yazım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Baghdadi, N., Gaultier, S., & King, C. (2002). Retrieving surface roughness and soil moisture from synthetic aperture radar (SAR) data using neural networks. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(5), 701-711.
- Baghdadi, N., Zribi, M., Loumagne, C., Ansart, P., & Anguela, T. P. (2008). Analysis of TerraSAR-X data and their sensitivity to soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote sensing of environment*, 112(12), 4370-4379.
- Baghdadi, N., Aubert, M., & Zribi, M. (2011). Use of TerraSAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3), 512-516.
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Lili-Chabaane, Z., Gao, Q., & Fanise, P. (2018). Soil moisture and irrigation mapping in A semi-arid region, based on the synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 10(12), 1953.
- Chai, X., Zhang, T., Shao, Y., Gong, H., Liu, L., & Xie, K. (2015). Modeling and mapping soil moisture of plateau pasture using RADARSAT-2 imagery. *Remote Sensing*, 7(2), 1279-1299.
- Chen, X. Z., Chen, S. S., Zhong, R. F., Su, Y. X., Liao, J. S., Li, D., Han, L. S., & Li, X. (2012). A semi-empirical inversion model for assessing surface soil moisture using AMSR-E brightness temperatures. *Journal of Hydrology*, 456, 1-11.
- Demir, İ., Kılıç, G., Coşkun, M., & Sümer, U. M. (2008). Türkiye'de maksimum, minimum ve ortalama hava sıcaklıkları ile yağış dizilerinde gözlenen değişiklikler ve eğilimler. *TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, 69-84.
- Dubois, P. C., van Zyl, J., & Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33(4), 915-926.

- Ezzahar, J., Ouaadi, N., Zribi, M., Elfarkh, J., Aouade, G., Khabba, S., Er-Raki, S., Chenbouni, A., & Jarlan, L. (2020). Evaluation of backscattering models and support vector machine for the retrieval of bare soil moisture from Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 12(1), 72.
- Holah, N., Baghdadi, N., Zribi, M., Bruand, A., & King, C. (2005). Potential of ASAR/ENVISAT for the characterization of soil surface parameters over bare agricultural fields. *Remote sensing of environment*, 96(1), 78-86.
- Huang, S., Ding, J., Zou, J., Liu, B., Zhang, J., & Chen, W. (2019). Soil moisture retrieval based on sentinel-1 imagery under sparse vegetation coverage. *Sensors*, 19(3), 589.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Kadioğlu, M. (2008). *Kuraklık Kıranı Risk Yönetimi*. Kadioğlu, M., & Özdamar, E. (ed) *Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri* (s. 277-300). Ankara: JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2.
- Kadioğlu, M. (2012). *Türkiye'de İklim Değişikliği Risk Yönetimi*. Türkiye'nin İklim Değişikliği II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını.
- Kaleita, A. L., Tian, L. F., & Hirschi, M. C. (2005). Relationship between soil moisture content and soil surface reflectance. *Transactions of the ASAE*, 48(5), 1979-1986.
- Kapluhan, E. (2013). Türkiye'de Kuraklık ve Kuraklığın Tarıma Etkisi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27, 487-510.
- Kurucu, Y., Şanlı, F. B., Esetlili, M. T., Bolca, M., & Göksel, C. (2009). Contribution of SAR images to determination of surface moisture on the Menemen Plain, Turkey. *International Journal of Remote Sensing*, 30(7), 1805-1817.
- Lievens, H., & Verhoest, N. E. (2012). Spatial and temporal soil moisture estimation from RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands. *Journal of Hydrology*, 456, 44-56.
- Moran, M. S., Alonso, L., Moreno, J. F., Mateo, M. P. C., De La Cruz, D. F., & Montoro, A. (2012). A RADARSAT-2 quad-polarized time series for monitoring crop and soil conditions in Barrax, Spain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(4), 1057-1070.
- Oh, Y. (2004). Quantitative retrieval of soil moisture content and surface roughness from multipolarized radar observations of bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3), 596-601.
- RADARSAT (2000). Data Product Specification, RSI-GS-026, Revizyon 3,1-125.
- Rahman, M. M., Moran, M. S., Thoma, D. P., Bryant, R., Collins, C. H., Jackson, T., Orr, B. J., & Tischler, M. (2008). Mapping surface roughness and soil moisture using multi-angle radar imagery without ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 391-402.
- Sertel, E. (2008). *Remote Sensing and Regional Climate Modeling of the Impacts of Land Cover Changes on the Climate of the Marmara Region of Turkey* (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Sertel E., & Örmeci, C. (2009). Uzaktan Algılama Verilerinin İklim Biliminde Kullanım Olanakları. 12. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara
- Şekertekin, A., Marangoz, A. M., & Abdikan, S. (2018). Soil moisture mapping using Sentinel-1A synthetic aperture radar data. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5(2), 178-188.
- Şekertekin, A., Marangoz, A. M., & Abdikan, S. (2020). ALOS-2 and Sentinel-1 SAR data sensitivity analysis to surface soil moisture over bare and vegetated agricultural fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105303.
- Türkeş, M. (2007). İnsanın küresel iklim üzerindeki etkileri, gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği ve değişiklikleri ile sonuçları. *Küresel İklim Değişimi ve Su Sorunlarının Çözümünde Ormanlar Sempozyumu*, İstanbul.
- Wang, L., & Qu, J. J. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(2), 237-247.
- Xie, Q., Meng, Q., Zhang, L., Wang, C., Sun, Y., & Sun, Z. (2017). A soil moisture retrieval method based on typical polarization decomposition techniques for a maize field from full-polarization radarsat-2 data. *Remote Sensing*, 9(2), 168.
- Yang, L., Feng, X., Liu, F., Liu, J., & Sun, X. (2019). Potential of soil moisture estimation using C-band polarimetric SAR data in arid regions. *International Journal of Remote Sensing*, 40(5-6), 2138-2150.
- Yılmaz, M. (2008). *Active Microwave Remote Sensing of Soil Moisture: A Case Study in Kurukavak Basin* (Doktora Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Zribi, M., Baghdadi, N., Holah, N., & Fafin, O. (2005). New methodology for soil surface moisture estimation and its application to

ENVISAT-ASAR multi-incidence data inversion. *Remote sensing of environment*, 96(3-4), 485-496.




Zribi, M., Kotti, F., Lili-Chabaane, Z., Baghdadi, N., Issa, N. B., Amri, R., Duchemin, B., & Chehbouni, A. (2011). Soil texture estimation over a semiarid area using TerraSAR-X radar data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3), 353-357.

Yazar Bilgileri



0000-0002-5012-2773, sevinc.madenoglu@tarimorman.gov.tr (Madenöğlu S.)*
0000-0003-2546-500X, hesna.ozcan@tarimorman.gov.tr (Özcan H.)
0000-0002-6596-8982, murat.peker@tarimorman.gov.tr (Peker M.R.)
0000-0002-4348-5541, melisozge.pinar@tarimorman.gov.tr (Pınar M.Ö.)
0000-0001-7122-2151, suat.akgul@tarimorman.gov.tr (Akgül S.)
0000-0003-1665-4677, mehmet.kececi@tarimorman.gov.tr (Keçeci M.)
0000-0001-5398-5497, tulay.tuncay@tarimorman.gov.tr (Tunçay T.)
0000-0002-5151-5907, mahmuthilmi.secmen@tarimorman.gov.tr (Seçmen M.H.)
0000-0002-8744-5939, alikoc6164@hotmail.com (Koç A.)
0000-0003-0553-2682, mustuner@artvin.edu.tr (Üstüner M.)
0000-0002-4715-5160, asekerterkin@cu.edu.tr (Şekertekin A.)
0000-0002-3310-352X, sayginabdikan@hacettepe.edu.tr (Abdikan S.)
0000-0002-8095-4247, tolga.esetlili@ege.edu.tr (Esetlili M.T.)
0000-0003-3004-4912, asensoy@eskisehir.edu.tr (Sensoy A.)
0000-0002-4962-0492, kayasina@itu.edu.tr (Kaya Ş.)
0000-0002-3797-6969, erpul@ankara.edu.tr (Erpul G.)
0000-0003-1243-8299, fbalik@yildiz.edu.tr (Balık Şanlı F.)

ITRF96-ED50 Transformasyonu: Radyal esaslı enterpolasyon ve küresel harmonik modelleme

İlke Deniz^{1*} , Şenol Hakan Kutoğlu¹ , Rasim Deniz² 

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Merkez, Zonguldak, Türkiye.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Sarıyer, İstanbul, Türkiye.

Öz: Datum transformasyonu; doğrudan, ortak noktaların koordinatları arasındaki geometrik bağıntılar ile veya ortak noktaların koordinat farklarının gridlenmesi veya modellenmesi yoluyla gerçekleştirilir. Bu çalışmada; 2591 ortak nokta verisi kullanılarak bir grid çerçevesinin elde edilmesi için uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon yöntemi ve küresel harmonik fonksiyonlarla modelleme yöntemi uygulanmış ve bu yöntemlerin doğrulukları 25 kontrol noktasıyla belirlenmiştir. Değerlendirmelerden önce verideki trend "Standart Molodensky Transformasyonu" ile büyük ölçüde giderilmiştir. Orijinal verinin uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyonu ile, 15'x15' lık, 66x20=1320 noktalık bir grid çerçevesi üretilmiştir. Bu çerçeve kullanılarak, kontrol noktalarının uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon ile hesaplanan datum parametrelerinin doğrulukları, boylamda ± 0.225 m ve enlemde ± 0.189 m bulunmuştur. Orijinal verinin küresel harmonik fonksiyonlarla modellenmesinin duyarlılığı boylamda $\pm 0.035''$ (~ 0.84 m) ve enlemde $\pm 0.0245''$ (~ 0.76 m) bulunmuştur. Gridlenmiş veri de, küresel harmonik fonksiyonlarla modellenmiştir. Bu modellemenin duyarlılığı, boylamda $\pm 0.0177''$ (~ 0.424 m) ve enlemde $\pm 0.0129''$ (~ 0.398 m) bulunmuştur. Bu model kullanılarak, kontrol noktalarının datum parametreleri hesaplanmıştır. Kontrol noktalarının datum parametrelerinin doğruluğu boylamda, ± 0.38 m ve enlemde ± 0.28 m bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Datum transformasyonu, Radyal esaslı enterpolasyon, Küresel harmonik fonksiyonlar

ITRF96-ED50 Conversion: Radial basis interpolation and modelling with spherical harmonics

Abstract: Datum transformation is carried out directly by geometric relations between the coordinates of common points or by gridding or modeling the coordinate differences of common points. In this study, to obtain a grid frame using 2591 common point data, the inverse distance weighted interpolation method and spherical harmonic functions modeling method are applied and the accuracies of these methods are determined with 25 control points. Before the evaluations, the trend in the data has been largely eliminated by "Standard Molodensky Transformation". A grid frame of 15'x15' from 66x20 = 1320 points is generated by the inverse distance weighted interpolation of the original data. Using this frame, the accuracy of the datum parameters derived from the inverse distance weighted interpolation of the control points is found to be ± 0.225 m for longitude and ± 0.189 m for latitude. The precision of the spherical harmonic functions modeling of the original data is obtained as $\pm 0.035''$ (~ 0.84 m) for longitude and $\pm 0.0245''$ (~ 0.76 m) for latitude. Gridded data is also modeled with spherical harmonic functions. The precision of this modeling is found to be $\pm 0.0177''$ (~ 0.424 m) for longitude and $\pm 0.0129''$ (~ 0.398 m) for latitude. Using this model, the datum parameters of the control points are calculated. The accuracy of the datum parameters of the control points is found to be ± 0.38 m for longitude and ± 0.28 m for latitude.

Keywords: Datum transformation, Radial basis interpolation, Spherical harmonics

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 372 291 25 76

Geliş Tarihi/Received: 07.01.2021

Kabul Tarihi/Accepted: 24.04.2021



0000-0002-2970-1148, ideniz@beun.edu.tr (Deniz İ.)
0000-0001-6587-3417, kutoglu@hotmai.com (Kutoğlu Ş.H.)
0000-0003-1519-1025, denizr@itu.edu.tr (Deniz R.)

1. Giriş

Datum transformasyonu, jeodezinin önemli konularından biridir. Son senelerde, uydu ve uzay tekniklerinin rasyonel kullanılmaya başlanmasıyla, yerin ağırlık merkezinin konumunun ve eksen yönelmelerinin doğrulukları büyük ölçüde artmıştır. Bu sayede, mutlak sisteme yakın yer merkezli koordinat sistemleri ve normal elipsoit tanımlanabilmiştir. Uluslararası yersel referans sistemi (International Terrestrial Reference System, ITRS) ve jeodezik referans sistemi 1980'in (Geodetic Reference System 80, GRS80) fiziksel gerçekleşmesi olan Uluslararası yersel referans çerçevesi (International Terrestrial Reference Frame, ITRFxx) datumları “mutlak datum”lar olarak benimsenmiştir.

Uydu ve uzay tekniklerinin ve bu tekniklerle üretilen ürünlerin kullanılması, uluslararası jeodezik referans sistemine entegrasyon gibi nedenlerle, geleneksel yöntemlere dayalı olarak oluşturulan ulusal ve bölgesel referans koordinat sistemleri “bağıl datumlar”ın mutlak datumlarla ilişkilendirilmesi çalışmalarını güncel problemler haline gelmiştir.

Türkiye referans koordinat sistemi; 2005 yılında yürürlüğe giren Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği'nde (BÖHHBÜY) (HKMO, 2005), 1996 yılında güncellenen ITRF datumu ITRF96 (ITRS+GRS 80) olarak alınmıştır. Böylece, ITRF96-ED50 datum transformasyonu problemi ortaya çıkmıştır.

Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı (TUTGA) 2000 yılında tamamlanmış ve Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif) 2011 yılında devreye girmiştir. Böylece, uydu ve uzay teknolojilerinin uygulama alanı genişletilmiştir.

Datum transformasyonu çalışmaları değerlendirildiğinde, iki datum arasındaki transformasyonun doğruluğunun genel olarak; her iki sistemdeki ağların doğruluklarına, uzunluk ve doğrultu bozulmalarına, transformasyonda kullanılan ortak noktaların yoğunluğuna ve dağılımına, transformasyonu yapılan alanın büyüklüğüne, kullanılan transformasyon modeline bağlı olduğu görülmektedir (Çepni & Deniz, 2005; Eren & Uzel, 2008). Bu çerçevede, geliştirilen modeller; doğrudan, ortak nokta koordinatları arasındaki geometrik bağıntılara dayanan modeller (geometrik modeller; afin, benzerlik, ortogonal transformasyon modelleri), koordinat farklarının gridlenmesi ve/veya modellenmesi esasına dayanan matematiksel yöntemler (polinomlar, enterpolasyon, kollokasyon, sonlu elemanlar, küresel harmonik fonksiyonlar vb.) olmak üzere iki temel gruba ayrılabilir.

2018 BÖHHBÜY'de, datum transformasyonu standartları; “200 km²'ye kadarki alanlar için en az 4 ortak nokta ve her 200 km² için 1 ortak nokta ilave” ve “veri-model uyumu duyarlılığı ± 9 cm” olarak verilmektedir (HKMO, 2018). Bu yönetmeliğe göre yerel ölçekte çok sayıda datum parametreleri seti hesaplanmıştır ve kullanılmaktadır.

Tüm Türkiye için, bütüncül datum transformasyonu parametrelerinin hesaplanması çalışmaları da yapılmıştır. [Firat ve Lenk \(2002\)](#)'de, 212 adet yüksek dereceli Türkiye Nirengi Ağı noktası alınarak gerçekleştirilen 7 parametrelilik benzerlik transformasyonunda, transformasyon duyarlılığı 75-100 cm ve fay bölgelerinde 4-5 m olarak verilmektedir. Aynı veri ile kriging yöntemiyle yapılan 3'x3' lık gridlemenin transformasyon duyarlılığı 15-30 cm ve fay bölgelerinde 1.5-2 m olarak verilmektedir. [Kutoğlu, Mekik ve Akçın \(2003\)](#)'te, transformasyon parametrelerinin koordinat hatalarından etkilenmesi araştırılmıştır. [Kutoğlu ve Ayan \(1998\)](#)'de, üç boyutlu transformasyonda yükseklik probleminin çözüm yaklaşımları araştırılmıştır. [Çepni ve Deniz \(2005\)](#)'te, bütüncül, sürekliliği olan transformasyonlar için sonlu elemanlar yönteminin kullanılması araştırılmıştır.

CORS-TR Projesi'nde, büyük ölçekli çalışmalarda kullanılacak, bütüncül ulusal hücreli transformasyon parametrelerinin hesaplanması da amaçlanmıştır. Bu çerçevede, TKGM, HGM, TCK, İller Bankası vd. kamu kurumlarının ürettiği

koordinatların derlenmesi ve 3000 civarında yeni ortak noktanın ölçülmesi planlanmıştır (Eren & Uzel, 2008). Aktuğ vd. (2011)'de, CORS-TR Projesi çerçevesinde derlenen ve ölçülen 4024 nokta ile minimum eğrilik ve kriging yöntemleri kullanılarak $0.13^\circ \times 0.10^\circ$ 'lik gridlemeler gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemle de birbirine yakın, boylamda ± 0.26 m ve enlemde ± 0.27 m'lik transformasyon duyarlılığı bulunmuştur.

Çalışmalar ve CORS-TR Projesi'nin sonuçları, daha fazla veri ile yeni yöntemlerin de araştırılması gerektiğini vurgulamaktadır. Çalışmalarda, veri-model uyuşumunun yanında, kontrol noktaları ile modelin doğruluğunun (dış duyarlık) da araştırılması gereği ifade edilmektedir. Bir ulusal datum transformasyonu setinin güvenilirliği, farklı yöntemlerle elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla sağlanmalıdır.

Uygulamada hesaplanan çok sayıda yerel ölçekte datum transformasyon parametreleri setlerinin birleştirilmesi, bu parametreler arasındaki sürekliliğin sağlanması jeodezinin temel görevleri arasındadır.

Bu çalışmanın amacı; tüm Türkiye için, lokal komşuluk yaklaşımı ile, hücresele transformasyona da uygun, radyal esaslı fonksiyonlarla verinin gridlenmesi ve küresel harmonik fonksiyonlarla modellenmesi, her iki yöntemle sağlanan datum transformasyonunun doğruluğunun kontrol noktaları setiyle kontrolü, sonuçların karşılaştırılarak yöntemlerin kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

2. Transformasyon Verisinin Tanımı ve Trend Hesabı

ITRF96 ile ED50 datumları geometrik olarak incelendiğinde aşağıdaki hususlar söz konusudur.

i-) Farklar ED50'nin düzeltmeleri olarak, yani; fark=ITRF96-ED50 ile tanımlanırsa, iki sistemin büyük eksenleri arasındaki fark $\Delta a = -251$ m ve $\Delta a/a = -39.35$ ppm'lik üç boyutlu ölçek farkı oluşturur. Basıklık farkı Δf ise, enleme bağlı bir ölçek değişimi verir. Buna göre iki elipsoit benzer değildir.

ii-) ED50'nin orijini ITRF96'ya göre, $\lambda \approx 228.5^\circ$ doğu ve Türkiye'ye göre (ortalama boylam 36° için) doğuya doğru 192.5° 'de, yani dönme eksenine göre Türkiye'nin yaklaşık arkasına gelmektedir. ED50 elipsoidi, ITRF96 elipsoidal normali doğrultusunda yaklaşık 40 m aşağıdadır. Bunun sonucu, yaklaşık $-6 - 7$ ppm'lik bir indirgeme söz konusudur.

iii-) Ekvator düzleminde koordinat eksenlerinin oluşturduğu bölgelere göre, küçük alanlar örneğin Türkiye ve hatta Avrupa tek bir bölgede kalır. Bu durum, GPS alıcısına göre uyduların bir bölgede dar bir alanda birikmelerine benzerdir ve geometri bozukluğu oluşturur. Bunun sonucu olarak, küçük alanlarda ITRF96 ile ED50 arasındaki üç boyutlu transformasyonlar yeterli doğruluğu sağlayamaz. Ayrıca, transformasyon parametreleri arasında yüksek matematiksel korelasyonlar oluşur ve parametre değerleri birbirine bulaşır (Leick, 2004). Bu durum özellikle dönme ile ölçek parametreleri arasında oluşur. ED50'nin ölçek bozulmaları $-6 - 7$ ppm ölçeği de dikkate alınarak değerlendirilmeli ve ölçek parametresinin güvenilirliği buna göre irdelenmelidir. Ancak, yer üzerinde homojen dağılmış uydu ve uzay istasyonları ağlarının (kuzey ve güney yarımkürede 8 bölge ile güçlü geometri) üç boyutlu datum transformasyonları en yüksek duyarlılıkları sağlar.

iv-) ITRF96 mutlak datum olarak alındığında, ED50'nin datum parametreleri Δa ; elipsoitlerin büyük eksenleri farkı, Δf ; elipsoitlerin basıklıkları farkı, ΔX , ΔY , ΔZ ; öteleme parametreleri, ϵ_X , ϵ_Y , ϵ_Z ; dönüklük parametreleri, m ; ölçek parametresi olacaktır. Eğer bu parametreler bilirse, ED50 boylamının düzeltmeleri $\Delta \lambda$ ve enleminin düzeltmeleri $\Delta \phi$ ve yükseklik düzeltmeleri Δh hesaplanabilir. Bu düzeltmeler sadece geometrik bağıntılarla hesaplanabilirler. Bunlar, model hatalarından, ağlardaki bozulmalardan, kabuk hareketleri vb. bozucu etkilerden bağımsızdır ve Türkiye için ortalama, $\Delta \lambda \approx -1,6''$ ve $\Delta \phi \approx -$

3,5" civarındadırlar. Bu farklar, ED50 koordinatlarının “trend”ini oluşturur. ED50 için Δa , Δf parametreleri kesin olarak bilinmektedir. Öteleme parametreleri ΔX , ΔY , ΔZ birçok çalışmada hesaplanmıştır. Eğer;

$$fark = \Delta_{fark} + dfark = ITRF\ 96 - ED\ 50 \quad (1)$$

olarak tanımlanırsa,

$$dfark = ITRF\ 96 - (ED\ 50 + \Delta_{fark}) \quad (2)$$

ile, ED50 koordinatlarındaki trendlerin büyük bir kısmı giderilebilir. Burada; Δ_{fark} , trend değeridir ve Molodensky Transformasyon Formülleri ile hesaplanabilir (DMA, 1988; IHO, 2008; NGA, 2014). Her nokta için elipsoitlerin ölçek farklarından ve büyük ölçüde ötelemeden arınmış $dfark$ değerleri elde edilebilir. Datum transformasyonunda, bu değerler enterpole edilebilir ve modellenenebilir. Çünkü her nokta için Δ_{fark} değerleri tek ve değişmezdir. Bu değerlendirme stratejisi, FINELTRA (affine transformation by infinite elements), swisstopo, CHENyx06 gibi birçok datum transformasyonunda temel strateji olarak kullanılmaktadır.

3. Radyal Esaslı Fonksiyonlarla Enterpolasyon

Koordinat farklarının enterpolasyonu yoluyla bir grid ağının elde edilmesi ve bu grid ağından yine enterpolasyon ile transformasyon izlenen yollardan biridir. Matematikteki enterpolasyon yöntemlerine ilave olarak, bilgisayar grafik ve coğrafi bilgi sistemlerinin de gereksinimleri sonucu, özellikle mekansal enterpolasyon konusunda çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Burada, veriye en uygun enterpolasyon yönteminin seçimi önem kazanmaktadır.

Farklı derecelerde, farklı zamanlarda gerçekleşmiş, kabuk hareketleri, zemin hareketleri, modelleme, bozulma vb. etkileri içeren dağınık koordinat farkları için en uygun enterpolasyon yöntemlerinden biri olarak, Anjyo, Lewis ve Pighin (2014)’te radyal esaslı fonksiyonlarla enterpolasyon, Mitas ve Mitasova (1999)’da “lokal komşuluk yaklaşımı ile enterpolasyon” ve URL-1’de “deterministik enterpolasyon” adları ile de ifade edilen “uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon” yönteminin de incelenmesi uygun olacaktır. Yöntem ile gerçekleştirilen çalışmalarda, yöntemin veriyi harmanladığı, düzgünleştirdiği ve çok iyi enterpole ettiği ifade edilmektedir (Anjyo, Lewis ve Pighin, 2014; Mitas & Mitasova, 1999; URL-1).

Uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyonun matematik modeli;

$$F(r) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot z(r_i) = \frac{\sum_{i=1}^m z(r_i)/|r-r_i|^p}{\sum_{j=1}^m 1/|r-r_j|^p} \quad (3)$$

olarak verilir (Mitas & Mitasova, 1999). Burada; ω_i noktanın ağırlık fonksiyonu, $z(r_i)$ noktadaki değer, r konum vektörü, $|r - r_i|^p$ den, $p = 1$ için iki radial vektörün farkı, yani noktalar arasındaki uzunluk olur. Noktalar arasındaki uzunluk s sınırlandırılarak, enterpole edilecek nokta etrafındaki komşu noktaların seçilmesi sağlanır. Bu s yarıçaplı daire, CORS-TR Projesi’ndeki hücre ifadesi ile eşdeğerdir. Hücre alanı büyütülüp küçültülerek en uygun yarıçap belirlenebilir.

4. Küresel Harmonik Fonksiyonlarla Modelleme

Datum farkından kaynaklanan koordinat farkları bütüncül bir yaklaşımla da modellenenebilir. Bu yaklaşımda datum transformasyonu modelin parametreleri yoluyla sağlanır. Küresel yüzeyler üzerinde skaler alanların modellenmesinde küresel harmonik fonksiyonlar (KHF) vazgeçilmez araçlardır. Küresel harmonik fonksiyonlarla modelleme, sonuçların

görselleştirilmesi yoluyla analizinde de önemli bir yoldur.

Boylam ve enlem farkları, meridyen ve paraleller doğrultusunda sistematik bileşenlere sahip olabilir veya bazı bölgelerde sistematik bileşenler daha fazladır. Boylam ve enlem farkları skalar boylam farkı ve skalar enlem farkı alanlarını oluşturur. Ancak, genel olarak her iki alanın da düzgün bir gidiş göstereceği söylenebilir.

Genel olarak, üç boyutlu KHF, bir R eğrilik yarıçaplı küresel yüzeyin dışı ve yukarısı için;

$$f(r, \varphi, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n P_{nm} \sin(\varphi) [A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda)] \quad (4)$$

olarak verilir. Burada; r konum vektörü, φ enlem, λ boylam, n derece, m mertebe, $P_{nm} \sin(\varphi)$ Legendre fonksiyonu, A_{nm} ve B_{nm} harmonik katsayılarıdır. Eğer $R/r = 1$ alınrsa, iki boyutlu modelleme söz konusudur (Deniz, 2020; Vanicek & Krakiwski, 1986).

Skaler büyüklüklerin en küçük kareler yöntemiyle modellenmesinde;

$$a_{nm} = \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} P_{nm} \sin(\varphi) \cos(m\lambda) \quad (5a)$$

$$b_{nm} = \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} P_{nm} \sin(\varphi) \sin(m\lambda) \quad (5b)$$

alınarak, belirlenen n ve m için dizayn matrisi,

$$\mathbf{A} = [a_{00} \ a_{10} \ a_{11} \ b_{11} \ a_{20} \ \dots] \quad (6)$$

ve bilinmeyenler matrisi,

$$\mathbf{X} = [A_{00} \ A_{10} \ A_{11} \ B_{11} \ A_{20} \ \dots] \quad (7)$$

ile,

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{I} \quad (8)$$

modelleme parametreleri olarak A_{nm} ve B_{nm} katsayıları, boylam ve enlem farkları için ayrı ayrı hesaplanır. Burada \mathbf{I} ölçü vektörü olarak alınır. Buradan;

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{I} \quad (9)$$

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-u}} \quad (10)$$

ile “veri-model uyuşum duyarlılığı” bulunur. Burada n ; ölçü sayısı, u ; bilinmeyenler sayısıdır.

Yeryuvarına göre çok küçük sayılabilecek alanlarda, trigonometrik fonksiyonlar birbirine yakın değerlerde olduğundan, küresel harmonik fonksiyonlarla modellemede normal denklemler matrisi $\mathbf{N} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ zayıf kondüsyonlu olur ve inversinin alınması zorlaşır. Bu problem, “Genelleştirilmiş Tikhonov Düzenleme Algoritması” ile çözülebilmektedir. Algoritmaya göre;

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{I} \quad (11)$$

olur. Burada λ düzenleme parametresi ve \mathbf{B} boyutları bilinmeyenler sayısına bağlı bir kare matristir ve

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ -1 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (12)$$

şeklinde alınır. Optimal çözüm için λ parametresi değiştirilerek hesaplanan m_0 değerleri, bir (λ, m_0) eğrisinde incelenir. Maksimum eğrilik noktası (L şekli) optimal çözümü veren λ olur (Yagle, 2005).

5. Datum Transformasyonu Uygulamaları

5.1 Test Verisinin Tanımı

Bu çalışmada, kamu kurum ve kuruluşlarından derlenen ortak 2676 noktanın ITRF96 (2005 epeğunda) ve ED50 datumlarındaki elipsoidal boylam ve enlem değerleri esas alınmıştır (Eren & Uzel, 2008).

Elipsoidal koordinat farkları;

- $\lambda_{fark} = \lambda_{ITRF96} - \lambda_{ED50} \cong -1.6'' (\sim 38 \text{ m})$
- $\varphi_{fark} = \varphi_{ITRF96} - \varphi_{ED50} \cong -3.5'' (\sim 108 \text{ m})$

civarındadır.

Her noktanın ED50 koordinatlarının trendleri “Standard Molodensky Transformasyonu Formülleri” kullanılarak hesaplanmıştır (NGA, 2014).

Hesaplamalarda, uluslararası kuruluşların benimsediği;

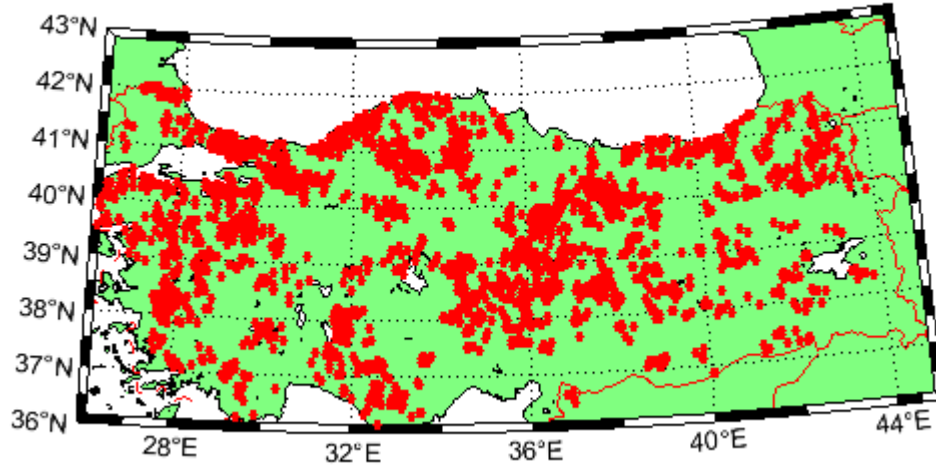
$$\Delta X = -87 \text{ m}; \Delta Y = -98 \text{ m}; \Delta Z = -121 \text{ m}; \Delta a = -251 \text{ m}; \Delta f = 1.419266 \times 10^{-5}$$

değerleri alınmıştır. Buna göre,

$$\min \Delta \lambda = -2.0891''; \max \Delta \lambda = -0.4337'' \text{ (DMA, 1988; IHO, 2008); } \min \Delta \varphi = -3.6121''; \max \Delta \varphi = -3.0661''$$

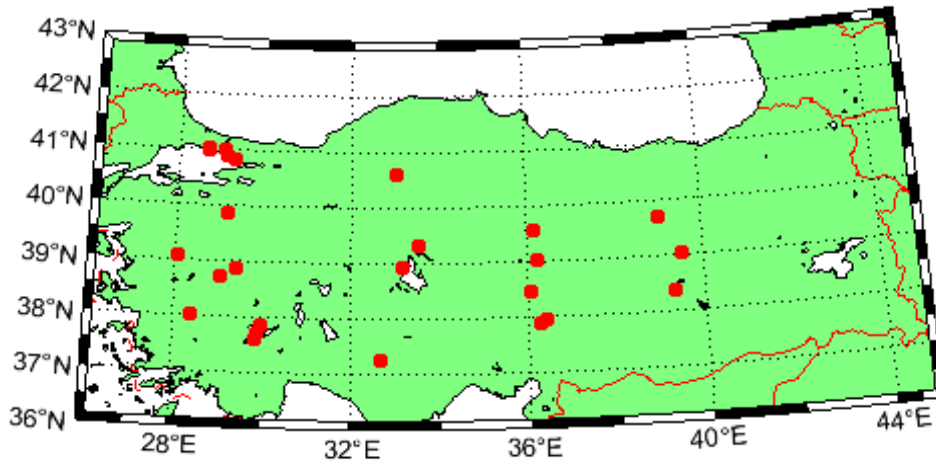
bulunmuştur. Hesaplanan trend değerleri ED50 koordinatlarına eklenerek, Eşitlik (2)'den, $\Delta \lambda$ ve $\Delta \varphi$ farkları hesaplanmıştır. Bu farklar; iki elipsoid arasındaki ölçek ve öteleme etkisinden olunca bağımsızdır ve orijinal farkların yaklaşık onda biri mertebesinde. Bu nedenle kaba hata araştırmasına daha uygundur.

Kaba hatalı noktalar, deneysel olarak bir yaklaşım ile $0.0'' < \Delta \lambda < 1.0''$ ve $-1.0'' < \Delta \varphi < 0.0''$ alınarak belirlenmiş ve ayıklanmıştır. Belirlenen kaba hatalı 60 nokta çıkarıldıktan sonra, rastgele ve olunca homojen dağılmış “kontrol noktaları seti” olarak 25 nokta seçilmiş ve veriden ayrılmıştır. Böylece kalan 2591 noktanın dağılımı Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1: Test ağı noktalarının dağılımı

Kontrol noktalarının dağılımı Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2: Kontrol noktaları ağı

Datum transformasyonunda kullanılacak orijinal verinin istatistik özellikleri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1: Orijinal verinin $\Delta\lambda$ ve $\Delta\varphi$ farkları istatistiği

Parametre	Minimum (")	Maksimum (")	Ortalama (")
Boylam farkı ($\Delta\lambda$)	0.005	0.569	0.269
Enlem farkı ($\Delta\varphi$)	-0.412	-0.003	-0.230

5.2 Verinin Gridlenmesi: Uzunluğun Ters Ağırlıklı Enterpolasyon

Araştırma amaçlı olarak, boylamları 27.75° - 44.00° ve enlemleri 37.00° - 41.75° alanında $15' \times 15'$ lik grid ağı tanımlanmıştır. Böylece, $66 \times 20 = 1320$ noktalık bir ağ oluşturulmuştur. Bu grid ağının noktalarının boylam farkları $d\lambda_{grid}$ ve enlem farkları $d\varphi_{grid}$, Eşitlik (3)'e uygun olarak, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon ile hesaplanmıştır. Enterpolasyonda, $s < 1.5^{\circ}$ alınmıştır. Çünkü Marmara Denizi'ndeki ve veri yoğunluğunun az olduğu bölgeler için ancak bu uzunluk sınırlaması ile çözüm sağlanabilmiştir. Daha yoğun veri ile daha küçük s değerleri de denenebilecektir.

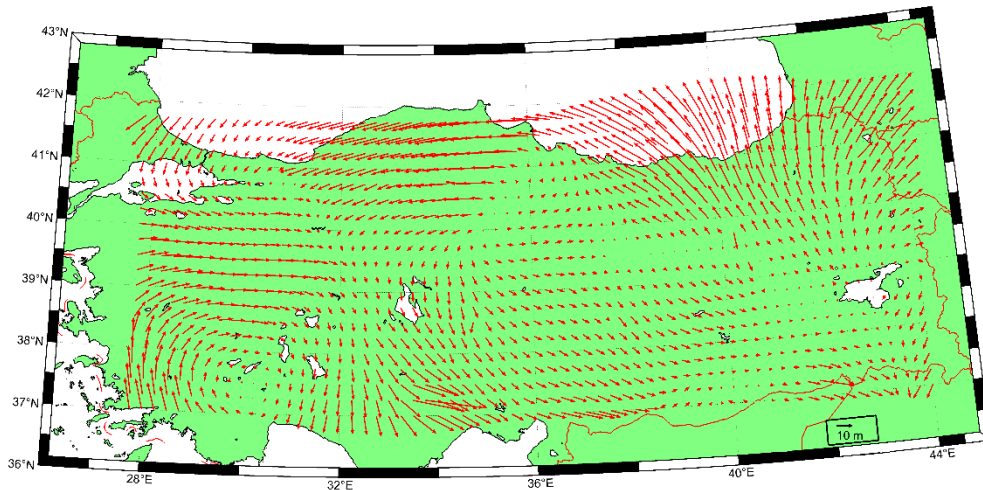
Hesaplanan $d\lambda_{grid}$ ve $d\varphi_{grid}$ değerlerinin istatistiği Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2: $d\lambda_{grid}$ ve $d\varphi_{grid}$ değerleri istatistiği

Parametre	Minimum (")	Maksimum (")	Ortalama (")
Boylam ($d\lambda_{grid}$)	0.1574	0.3416	0.2689
Enlem ($d\varphi_{grid}$)	-0.2930	-0.1886	-0.2313

Tablo 1'deki orijinal verilerle Tablo 2'deki gridlenmiş veriler karşılaştırıldığında, enterpolasyon ile minimum ve maksimum değerlerinin birbirine yaklaştığı ve ortalamaların çok az değiştiği görülmektedir. Bu sonuç, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon yönteminin güvenilirliğinin ve doğruluğunun kanıtıdır.

Gridlenmiş boylam ve enlem farklarının bileşke vektörleri, Şekil 3'te görülmektedir. Bu vektörlerin, artık öteleme etkilerini, kabuk hareketlerini ve ED50'deki bozulmaları da içerdiği söylenebilir.



Şekil 3: Gridlenmiş boylam ve enlem farklarının bileşke vektörleri

Kontrol noktalarının $d\lambda_{ent}$ ve $d\varphi_{ent}$ değerleri, gridlenmiş veri kullanılarak, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu değerlendirmede hücreler $s < 0.5^{\circ}$ olarak alınmıştır. Kontrol noktalarının koordinatlarına standart Molodensky transformasyonu eşitliğinden hesaplanan $\Delta\lambda$ ve $\Delta\varphi$ değerleri ve $d\lambda_{ent}$ ve $d\varphi_{ent}$ değerleri eklenerek, bu noktaların ITRF96 datumundaki değerleri bulunur. Yani;

$$\lambda_{ITRF\ 96,Hesap} = \lambda_{ED\ 50} + \Delta\lambda + \Delta\lambda_{ent} \quad (13a)$$

$$\varphi_{ITRF\ 96,Hesap} = \varphi_{ED\ 50} + \Delta\varphi + \Delta\varphi_{ent} \quad (13b)$$

olur. Kontrol noktalarının enlem ve boylamlarının bilinen ($\varphi_{orijinal}$, $\lambda_{orijinal}$) ve hesaplanan değerleri arasındaki farklar gerçek hata olarak alınabilir ve

$$\varepsilon_{\lambda} = \lambda_{orijinal} - \lambda_{ITRF\ 96,Hesap} \quad (14a)$$

$$\varepsilon_{\varphi} = \varphi_{orijinal} - \varphi_{ITRF\ 96,Hesap} \quad (14b)$$

olarak hesaplanır. Buradan, kontrol noktaları için birim ağırlıklı karesel ortalama hata;

$$m_{oK} = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon\varepsilon]}{n}} \quad (15)$$

şeklinde dir. Kontrol noktaları değerlendirme sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3: Kontrol noktaları sonuçları istatistiği

Parametre	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	Karesel Ort. Hata (m)
Boylam ($d\lambda_{ent}$)	-0.59	0.53	-0.04	0.225
Enlem ($d\varphi_{ent}$)	-0.20	0.51	0.07	0.189

Tablo 3'ten, kontrol noktalarının boylam ve enlem doğrultusundaki doğruluklarından, bu yöntemi kullanarak hesaplanan bir noktanın ITRF96 datumundaki lineer nokta konum doğruluğu, ortalama ± 0.294 m olur. Bu sonuç, şimdiye kadar, tüm Türkiye için elde edilen sonuçlar içinde en iyilerden biridir ve bu yöntemin üzerinde durulmaya değer olduğunun bir kanıtıdır (Aktuğ vd. 2011; Eren & Uzel, 2008; Fırat & Lenk, 2002).

5.3 Küresel Harmonik Fonksiyonlar ile Modelleme

Eşitlik (4) ile verilen genel küresel harmonik fonksiyon; $r = 1$, $R = 6374.5$ km, $n = 5$, $m = 5$ için açılmıştır. Eşitlik (5) ile verilen 36 katsayı hesaplanarak, 36 bilinmeyene kadar çözüm söz konusu olmaktadır.

Değerlendirmeye 36 bilinmeyen ile başlanmış ve boylam ve enlem farkları için en uygun model parametreleri ve düzenleme parametresi λ araştırılmıştır. $\mathbf{A} = [a_{00} \ a_{10} \ \dots \ b_{33}]$ olarak 16 bilinmeyen ve $\lambda = 1 \times 10^{-9}$ en uygun değer olarak belirlenmiştir. 2591 noktanın 16 bilinmeyen ile değerlendirmesi sonucunda;

- boylam için modelleme duyarlılığı, $m_{m\lambda} = \pm 0.0350''$ (~ 0.84 m),
- enlem için modelleme duyarlılığı, $m_{m\varphi} = \pm 0.0245''$ (~ 0.76 m),

bulunmuştur.

Düzgünleştirilmiş ve gridlenmiş verilerle çalışıldığında, KHF'lerin performanslarının arttığı bilinmektedir (Torge, 2001). Bu

çerçeve, gridlenmiş veri de KHF'lerle modellendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucu;

- boylam için modelleme duyarlılığı, $m_{m\lambda} = \pm 0.0177''$ (~ 0.424 m),
- enlem için modelleme duyarlılığı, $m_{m\varphi} = \pm 0.0129''$ (~ 0.398 m),

bulunmuştur. Orijinal veri sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, grid verinin KHF'lerle modellenmesi ile büyük oranda iyileşmenin olduğu görülmektedir.

Grid verinin doğruluğu kontrol noktaları ile kontrol edilmiştir. Bunun için; kontrol noktaları verisinden, kontrol noktaları dizayn matrisi, \mathbf{A}_K ;

$$\mathbf{A}_K = [ka_{00} \quad ka_{10} \quad \dots \quad kb_{33}] \quad (16)$$

16 bilinmeyene göre oluşturulmuştur. Modellemede boylam için bilinmeyenler \mathbf{X}_λ ve enlem için bilinmeyenler \mathbf{X}_φ ise, modelden boylam ve enlem farkları;

$$d\lambda_{model} = \mathbf{A}_K \mathbf{X}_\lambda \quad (17a)$$

$$d\varphi_{model} = \mathbf{A}_K \mathbf{X}_\varphi \quad (17b)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (14) ve Eşitlik (15)'e göre, karesel ortalama hatalar hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4: Grid verinin küresel harmonik modellemesinin doğruluğu

Parametre	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	Karesel Ort. Hata (m)
Boylam (ε_λ)	-0.67	0.78	-0.09	± 0.38
Enlem (ε_φ)	-0.79	0.54	0.03	± 0.28

Tablo 4, Tablo 2 ile karşılaştırıldığında Tablo 2 sonuçlarının daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak; Tablo 4 sonuçları, daha az ortak nokta sayısına karşın [Aktuğ vd. \(2011\)](#) değerleriyle oldukça uyumludur.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Koordinat farklarıyla datum transformasyonu yaklaşımında; bir grid ağı oluşturulur veya veri modellenir. Gridleme veya modellemede kullanılacak yöntemler için sistematik bileşenlerden arındırılmış veri gerekmektedir. ITRF96 ile ED50 koordinatları arasındaki farkların yaklaşık %90'ı trenddir. Bu trendin büyük bir kısmı "Standart Molodensky Transformasyonu" ile giderilebilir ve böylece enterpolasyon veya modelleme sürecinde trend belirleme gerekmez.

Türkiye için koordinat farkları ortalama boylamda $-1.6''$ ve enlemde $-3.5''$ iken, trend giderildikten sonra, datum transformasyonu için değerlendirilecek değerler ortalama boylamda $0.269''$ ve enlemde $-0.230''$ mertebesinde dir.

Gridleme çalışmalarında, veriye uygun enterpolasyon yönteminin seçimi önemlidir. Türkiye için ITRF96 ile ED50 arasındaki

koordinat farkları verisi, doğruluk açısından heterojen yapıdadır. Farklı derecelerde, farklı zamanlarda üretilen komşu noktalar söz konusudur. Bu nedenle, veriyi harmanlama, düzgünleştirme özelliği de olan yöntemlerden birinin seçimi uygun olacaktır. Bu çalışmada, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon yöntemi seçilmiş ve denenmiştir.

Kamu kurumlarından derlenen ortak noktalardan 25 adedi kontrol noktası ve 2591 nokta transformasyon noktası olarak seçilmiştir. Tüm noktaların trendleri hesaplanmış ve bu değerler ED50 koordinatlarına eklenmiştir. Araştırma amacıyla, 15'x15' lık 66x20=1320 noktalık bir grid ağı oluşturulmuş ve bu noktaların boylam farkları $d\lambda$ ve enlem farkları $d\phi$, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon ile orijinal farklardan hesaplanmıştır. Gridlenmiş bu değerlerden, yine uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon ile kontrol noktalarının $d\lambda$ ve $d\phi$ farkları hesaplanmıştır. Orijinal verinin istatistik özellikleri ile gridlenmiş verinin istatistik özellikleri karşılaştırıldığında, uzunluğun tersi ağırlıklı enterpolasyon yönteminin, transformasyon için kullanılabilir, tutarlı bir enterpolasyon yöntemi olduğu söylenebilir. Kontrol noktalarının gerçek ITRF96 koordinatlarıyla ve gridlenmiş veriden hesaplanan koordinatları arasındaki farklar değerlendirilerek; doğruluklar, boylamda ± 0.225 m ve enlemde ± 0.189 m bulunmuştur. Bu sonuçlar, oldukça umut vericidir.

Orijinal veri KHF'lerle modellenmiştir. $n = 3$ ve $m = 3$ 'e kadar açılımın yeterli olduğu ve 16 bilinmeyen ile modellemenin yapılabileceği belirlenmiştir. Bu modellemenin duyarlılığı; boylamda $\pm 0.035''$ (~ 0.84 m) ve enlemde $\pm 0.0245''$ (~ 0.76 m) bulunmuştur. Gridlenmiş veri de KHF'lerle modellenmiştir. Bu modellemenin duyarlılığı; boylamda $\pm 0.177''$ (~ 0.424 m) ve enlemde $\pm 0.0129''$ (~ 0.398 m) bulunmuştur. Bu sonuçlar, orijinal verinin modellenmesinden elde edilen doğrulukların yaklaşık iki katıdır. Grid verinin küresel harmonik modelinin doğruluğu da kontrol noktaları ile kontrol edilmiştir. Sonuçlar, boylamda ± 0.38 m ve enlemde, ± 0.28 m'dir. Gridleme ve modellemenin doğrulukları yöntemler üzerinde çalışmak için cesaret vericidir. CORS TR Projesi'nin bitiminden sonra, çok sayıda ortak noktanın üretilmiş olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, daha yoğun verilerle ve farklı kontrol noktaları ile çalışmalar sürdürülmelidir. Radyal esaslı diğer enterpolasyon yöntemleri, en uygun hücre boyutları, araştırma konularından bazılarıdır. Grid ağı ve modeller; yerel datum parametrelerinin birleştirilmesi için temel altyapıyı oluşturabilirler. Yerel parametrelerin birleştirilmesi ve datum transformasyonunda sürekliliğin sağlanması jeodezinin güncel görevi olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmadaki tüm değerlendirmeler, MATLAB'da kodlanan yazılımlar ile gerçekleştirilmiştir (URL-2, URL-3). Tüm haritalar MATLAB ortamında Pawlowicz (2020)'nin M_Map paketi kullanılarak çizdirilmiştir.

Yazar Katkısı

İlke Deniz: Fikir, Literatür taraması, Veri işleme, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Şenol Hakan Kutoğlu:** Tasarım, Denetleme, Makale değerlendirme. **Rasim Deniz:** Veri toplama, Makale değerlendirme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

- Aktaş, B., Seymen, S., Kurt, M., Parmaksız, E., Lenk, O., Sezer, S. & Özdemir, S. (2011). ED-50 (European Datum-1950) ile TUREF (Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi) Arasında Datum Dönüşümü. *Harita Dergisi*, 146, 8-17.
- Amisano, G., Lewis, J. P., & Pighin, F. (2014). Scattered data interpolation for computer graphics. In *ACM SIGGRAPH 2014 Courses* (ss. 1-69).
- Çepni, M. S., & Deniz, R. (2005). Sonlu Elemanlar Yönteminin Dönüşümlerde Kullanılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (93), 20-29.
- Deniz, İ. (2020). Investigation of Height-Dependent Systematic Component of ZTDs Using Spherical Harmonic Functions (SHF) and Empirical Orthogonal Functions (EOF). *Proceedings of the FIG Working Week 2020*, Amsterdam, Hollanda.
- DMA. (1998). Defence Mapping Agency Technical Reports, Washington, ABD.
- Eren, K., & Uzel, T. (2008). CORS-TR Datum Dönüşümü Raporu, *Ulusal CORS sisteminin kurulması ve datum dönüşümü projesi*. İstanbul Kültür Üniversitesi.
- Fırat, O., & Lenk, O. (2002). Avrupa Datumu 1950 (ED -50) ile Türkiye Temel GPS Ağı 1999 (TUTGA-99) arasında Datum Dönüşümü. *TUJK 2002 Yılı Bilimsel Toplantısı Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı*, İznik, Bursa.
- HKMO (2005). Açıklamalı-Örnekmeli Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, Ankara.
- HKMO (2018). Açıklamalı-Örnekmeli Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, Ankara.
- IHO. (2008). *User's Handbook on Datum Transformations Involving WGS 84*. USA: International Hydrographic Bureau (IHO).
- Kutoğlu, H., & Ayan, T. (1998). WGS84'den ED50 Koordinat Sistemine Dönüşümde Yükseklik Sorunu İçin Yeni Bir Yaklaşım. *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 85, 82-90.
- Kutoglu, H. S., Mekik, C., & Akcin, H. (2003). Effects of errors in coordinates on transformation parameters. *Journal of surveying engineering*, 129(3), 91-94.
- Leick, A. (2004). *GPS satellite surveying*. 3rd edition. New Jersey: Wiley.
- Mitas, L., & Mitsova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, 1(2).
- NGA. (2014). *WGS 84 Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, NGA Standardization Document, Department of Defense, World Geodetic System 1984, Office of Geomatics, USA.
- Pawlowicz, R. (2000). *M_Map: a mapping package for Matlab*. University of British Columbia Earth and Ocean Sciences.
- Torge, W. (2001). *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Vanicek, P., & Krakiwski, E. I. (1986). *Geodesy: The Concepts*. Amsterdam: Elsevier.
- Yagle, A. E. (2005). Regularized matrix computations. *matrix*, 500, 10.
- URL-1: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (Erişim Tarihi: Temmuz 2020).
- URL-2: https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/17775-gridding-and-interpolate-data?s_tid=srchtitle (Erişim Tarihi: Temmuz 2020).
- URL-3: <http://github.com/OSGeo/PROJ/pull/1897> (Erişim Tarihi: Temmuz 2020).

Kentsel teknik altyapı tesislerine yönelik uluslararası coğrafi veri modellerinin analizi

Azer İlgar^{1*}, Volkan Çağdaş²

¹Hacettepe Üniversitesi, Beytepe Kampüsü, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Çankaya, Ankara, Türkiye.

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye.

Öz: Teknik altyapı tesisleri, elektrik, su, doğalgaz, telekomünikasyon gibi hizmetleri ileten fiziksel nesnelere bu nesnelere oluşturduğu şebekeleri ifade eder. Günümüzde özellikle kentlerdeki nüfus artışı ile yer altı kullanımı yoğunlaşmakta; aynı zamanda özelleştirme süreçleriyle birlikte teknik altyapı sektöründe dağınık ve parçalı bir yapı meydana gelmektedir. Teknik altyapı tesislerine ait coğrafi veriler genellikle ilgili kuruluşlar tarafından işletme veya varlık yönetimi amacıyla çeşitli format ve yapılar da tutulmaktadır. Tesislerin planlama, inşaa, bakım ve onarım süreçleri ile acil durum müdahaleleri, afet planlama ve müdahale ile akıllı kent programları gibi uygulamalar, tüm kullanıcıların güncel konumsal veriye kısa sürede erişmelerini zorunlu kılar. Bu nedenle, teknik altyapı kuruluşları, yerel yönetimler ve diğer kamu kurumları arasında coğrafi veri değişiminin etkinleştirilmesi gerekir. Birçok ulusal ve uluslararası standardizasyon kuruluşu, coğrafi veri değişimi gerektiren farklı kullanım durumlarına yönelik gereksinimlere odaklanan veri (değişim) modelleri geliştirmekte ve/veya veri değişim yöntemleri belirlemektedir. Bu çalışma, teknik altyapı tesislerine ait coğrafi verilerin paylaşım süreçlerinin iyileştirilmesine olanak veren uluslararası veri standartları ve modellerini irdelemektedir. Uluslararası veri standartları ve modellerinin içerik, kapsam, işlevsellik ve coğrafi temsil yeteneklerinin, odaklandıkları kullanım durumlarına göre farklılık gösterdiği belirlenmiş; tüm gereksinimlere yanıt verecek bir coğrafi veri modelinin bulunmadığı vurgulanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Coğrafi veri standartları, Teknik altyapı tesisleri, Coğrafi veri değişimi, Coğrafi veri modelleri

An analysis of international geospatial information models for urban utility networks

Abstract: Utility networks consist of physical constructions which transport utility service products such as power, water, gas and telecommunication. The pressure of urban population growth increases the density of urban underground areas, moreover, privatization of utilities increases decentralization and fragmentation in the utility sector. Geographic information related to utility networks are mainly held in various formats by utility organizations for operation and asset management activities. Integration and information exchange of utility data are required for numerous activities, namely design, construction and repair of utility networks, disaster planning, emergency response. The differences in data models and information systems limit the ability of integration of different utility data, as well as information exchange among relevant parties such as utility companies, local authorities and other public bodies. Several national and international standardization organizations develop data models and/or data exchange methods that focus on the needs for different use cases which require geospatial data exchange. This paper examines international data models for sharing and exchange of utility network data. It is emphasized that there is no international data model addressing the needs of all use cases, while the models' content, scope, functionality, and geographic representation capabilities depend on the use cases they focus on.

Keywords: Geospatial data standards, Utility networks, Geospatial information exchange, Geospatial information models

1. Giriş

Teknik altyapı tesisleri, kent yaşamının işleyişi için gereksinim duyulan elektrik, temiz ve atık su, doğal gaz ve haberleşme gibi hizmetlerle ilişkili ürünlerin taşınması ve kontrol edilmesi için kurulmuş fiziksel yapılardır. Bir teknik altyapı şebekesi, bir teknik altyapı hizmetiyle ilişkili ürünü, kaynaktan alıcıya, birbirlerine bağlı kablo, boru, pompa, vana gibi tesisler aracılığıyla ulaştırır. Teknik altyapı tesisleri maliyet, zemin durumu, arazi kullanım durumu, güvenlik vb. gibi etmenlere bağlı olarak gömülü, yer üstünde veya zeminde kurulmuş olabilir. Genellikle kablo ve borular yer yüzeyindeki menholler ile erişilebilecek biçimde yolların altında gömülü olarak tesis edilmektedir. Teknik altyapı tesislerine ait coğrafi veriler, tesislerin malzeme, büyüklük, kapasite gibi fiziksel özellikleri ile (yatay ve bazen düşey) konumlarını içerir. Bu veriler, teknik altyapı kuruluşları tarafından genellikle işletme veya varlık yönetimi amacıyla üretilmekte ve yönetilmektedir. Teknik altyapı piyasasında özelleştirme ve ayırıştırma uygulamaları, faaliyet gösteren kuruluş sayısını önemli ölçüde artırmıştır. Dahası, bir teknik altyapı hizmetine ait toplama, iletim, dağıtım gibi hizmetlerin her biri farklı kuruluşlar tarafından sunulabilmektedir. Ayrıca, tesislerin sahipleri, kullanıcıları ve işletmecileri birbirlerinden farklı olabilir. Bu kuruluşların her biri farklı şema ve formatta coğrafi veri üretmektedir; diğer bir ifadeyle coğrafi veriler sözdizimsel, şematik ve anlamsal bakımdan heterojen bir yapıdadır (Beck, Fu, Cohn, Bennett, & Stell, 2008). Bu makale, teknik altyapı tesislerine ait heterojen ve dağınık yapıda bulunan coğrafi verilerin çeşitli uygulamalarda bütüncül biçimde kullanımı için geliştirilen coğrafi veri modelleme yaklaşım ve uygulamalarına odaklanmaktadır.

Farklı sektörlere ait teknik altyapı tesisleri, birbirlerine bağımlı, bir başka ifadeyle birbirleriyle konumsal, fiziksel ve işlevsel bakımdan ilişkili bulunan tesislerden oluşmaktadır (Islam & Moselhi, 2012; Rinaldi, Peerenboom, & Kelly, 2001; Yang, Ng, Xu, & Skitmore, 2018). Bu nedenle, farklı kuruluşlara ait teknik altyapı tesislerine ilişkin coğrafi verilere gereksinim duyan kimi faaliyetler coğrafi verilerin bütünleştirilmesini, ilgili kuruluşlar arasında veri değişimini ve paylaşımını zorunlu kılar. Ancak kuruluşların bu verileri gizlilik, güvenlik, rekabet vb. nedenlerle gizli tutma eğiliminde olmaları, verilerin şematik ve anlamsal bakımdan heterojen yapıda bulunması, coğrafi verilerin farklı uygulamalarda kullanılmak üzere paylaşılmasını ve bütünleştirilmesini güçleştirmektedir (olde Scholtenhuis, Hartmann, & Dorée, 2016).

Açık Coğrafi Konsorsiyum (Open Geospatial Consortium, OGC) Yaratıcılık Programı (Innovation Program) kapsamında geliştirilmekte olan Yeraltı Yapıları Pilot Projesi (Underground Infrastructure Pilot) ile ilgili “Yeraltı Altyapıları Kapsam Çalışması Mühendislik Raporu”, teknik altyapı tesislerine ait coğrafi veri değişimi ve paylaşımı gerektiren kullanım durumlarını; (1) rutin sokak kazıları, (2) acil durum müdahaleleri, (3) bakım programları, (4) büyük ölçekli inşaat projeleri, (5) afet planlama ve müdahale, (6) akıllı kent programları olarak belirlemiştir (Lieberman & Ryan, 2017).

Kent içlerinde yolların altını yoğun bir biçimde kullanan tesislerin kullanım ömürlerini doldurması, hasar görmesi veya yenilenmesi nedenleriyle yapılacak kazı ve inşaat çalışmalarının kent idareleri ile koordineli biçimde yürütülmesi, kazı ve inşaat süreçlerinde güvenliğin sağlanmasını ve ekonomik kayıpların önlenmesini sağlar (Talmaki, Kamat, & Cai, 2013). Altyapı kuruluşları ile yerel yönetimler, tekrarlı kazı çalışmaları ile birlikte olası kaza ve maddi hasarları önlemek için çalışma yapılan bölgede mevcut ve planlanan tesislere ait verilere gereksinim duyarlar. Bu verilerin doğru ve hızlı bir şekilde paylaşımı, mevcut tesislerin onarım, deplase edilme veya yeni tesislerin kurulma süreçlerindeki planlama, projelendirme ve inşaat faaliyetlerinin koordineli bir biçimde yürütülmesini sağlar. Ayrıca, bu verilerin varlığı inşaat çalışmaları ya da afetler nedeniyle tesislerin hasar görmesi sonucunda etkilenen kullanıcıların, bölgelerin ve diğer tesislerin tespit edilmesi, acil müdahaleler ile alınması gereken diğer önlemlerin belirlenmesi için coğrafi analizlerin yapılmasına olanak verir (Becker, Bartels, Hahne, Hempel, & Lieb, 2012).

Bu makalede, teknik altyapı tesislerine ilişkin coğrafi verilerin farklı uygulamalar için kullanımı, taraflar arasında paylaşımı ve değişimi için geliştirilen (standart) coğrafi veri modelleri incelenmektedir. Standart bir altyapı veri modeli, farklı sektörlerle ait altyapı tesislerinin coğrafi ve coğrafi olmayan özellikleri ile birbirleri arasındaki ilişkileri içeren bir şema sunarak verilerin değişimi ve temsilinde anlamsal ve yapısal bir birlik sağlar. Teknik altyapı verilerinin standartlaştırılması, farklı sistemler arasında birlikte çalışabilirliği geliştirir; kullanıcılara mevcut verileri yeniden kullanma, iş süreçlerini koordine etme ve hayati bilgileri verimli ve etkili bir şekilde paylaşma olanağı sağlar.

Coğrafi veri modellerinin içeriği, uygulama alanına veya amaca göre farklılık gösterir. Örneğin, rutin sokak kazıları için tesislerin 3 boyutlu konumları ile fiziksel özellikleri; bakım programları için ise bu özelliklere ek olarak kullanım ömürleri, üretim ve yerleştirme ya da devreye alınma, bakım, onarım zamanları gibi zamansal özellikler gereklidir. Acil durum müdahaleleri, afet planlama ile akıllı kent programları (Al-Hader, Rodzi, Sharif, & Ahmad, 2009; Marzouk & Othman, 2020), tüm teknik altyapı tesislerinin karşılıklı bağımlılıklarını da kapsayan bütüncül ve topolojik ağ yapısına sahip bir modelleme yaklaşımına gereksinim duyar (Becker vd., 2012). Büyük ölçekli inşaat mühendisliği projelerinde ise bölgedeki teknik altyapı tesislerine ait kapasite, fiziksel durum gibi bilgiler ile hassas (yatay ve düşey) konumsal veriler gereklidir (Gale & Hammerschmidt, 2015; Jung, 2012; Sterling vd., 2009). Kent ve çevre planlama, afet yönetim ve acil durum müdahale simülasyonları, ulaştırma, teknik altyapı tesislerinin planlanması ve inşası, işletmesi ve bakımı gibi birçok faaliyet teknik altyapı tesislerinin hem yatay hem düşey konum bilgilerine gereksinim duyar.

İzleyen bölümde uluslararası standardizasyon kuruluşları tarafından yayımlanmış ve halen geliştirilmekte olan standart veri modelleri ile bu modellerin literatürde öne çıkan uygulamaları özetlenmiştir. Ardından incelenen veri modellerinin içerikleri, geometrik temsil yetenekleri ve işlevsellikleri karşılaştırılmış, yapılan değerlendirmelerle makale sonlandırılmıştır.

2. Standart Veri Modelleri

2.1 INSPIRE Altyapı Ağları Profili

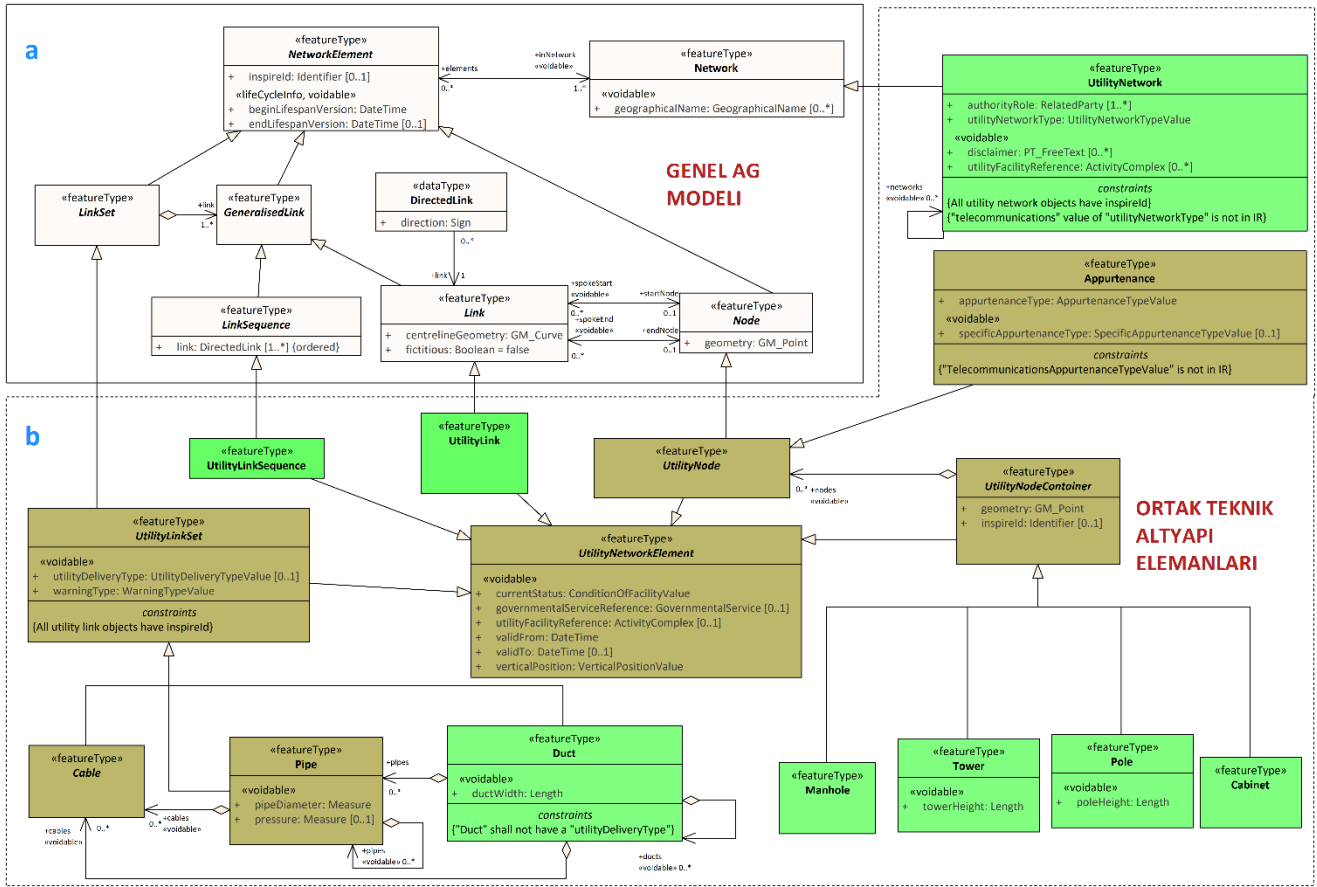
Avrupa Birliği coğrafi veri altyapısının oluşturulmasını amaçlayan INSPIRE girişimi, çevreyle ilişkili coğrafi verilerin hem ulusal düzeyde hem de Avrupa düzeyinde paylaşımının etkinleştirilmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda, çevresel politika ve uygulamalar için gereksinim duyulan coğrafi veriler, genel kavramsal model (General Conceptual Model) ve 34 veri teması ile tanımlanmıştır. Bu temalara ait coğrafi verilerin tanımlanmış veri spesifikasyonları ile uyumlandırılması hedeflenmiştir. Genel kavramsal model, birden fazla temada kullanılan ortak veri tipini ve modellerini tanımlamaktadır.

Teknik altyapı tesislerine ilişkin tanımlamalar Altyapı ve Kamusal Hizmetler (Utility and Governmental Services) veri temasında yer almaktadır. INSPIRE Teknik Altyapı Ağları (INSPIRE Utility Networks, INSPIRE-UN) veri şemasının amacı, farklı kuruluşların yönettiği değişken yapıda ve düzeyde bulunan veri ve veri modellerini uyumlu hale getirmektir (INSPIRE, 2013). Böylelikle teknik altyapı kuruluşları arasındaki verinin yeniden kullanımı etkinleşecektir.

INSPIRE-UN, genel kavramsal modelde tanımlanmış Genel Ağ Modelinin (Generic Network Model) bir profilidir. Teknik altyapı ağları profili, teknik altyapı ağlarının ve tesislerinin genel ağ modelinde sunulan yaklaşımla topolojik bir yapıda temsilini sağlar. Burada, birden fazla teknik altyapı şebekesinde yer alan ortak tesislere ve 6 farklı sektöre özgü tesislere ait uygulama şemaları yer almaktadır.

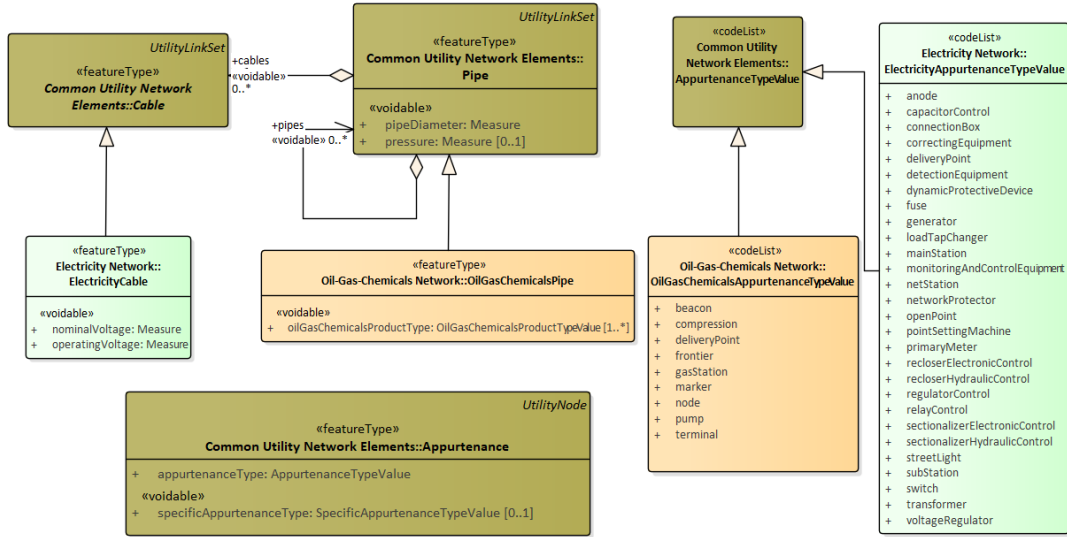
Genel Ağ Modeli, ağ özelliği gösteren veri temalarına (örneğin, ulaşım, hidrografiya, altyapı şebekeleri gibi) temel oluşturan bir uygulama şemasıdır (Şekil 1a). Burada esas olarak ağı oluşturan nokta ve çizgi geometrisine sahip nesnelere ait

ilişkiler tanımlanmaktadır. Bir doğrusal nesne, başındaki ve sonundaki düğüm noktalarıyla ve yönüyle birlikte tanımlanmakta, böylelikle ağ topolojisi sağlanmaktadır. Modelde temel sınıf olan *AğElemanı* (*NetworkElement*), *Ağ* (*Network*) sınıfını oluşturan elemanları temsil eder. Ağlardaki doğrusal nesnelere, *Hat* (*Link*), *HatSeti* (*LinkSet*) ve *HatDizisi* (*LinkSequence*) sınıflarıyla; nokta özelliğine sahip nesnelere ise *DüğümNoktası* (*Node*) sınıfı ile temsil edilmektedir.



Şekil 1: a) INSPIRE genel ağ modeli, b) Teknik altyapı ağları profilinde ortak teknik altyapı tesisleri

Teknik altyapı ağları profilinin oluşturulması için genel ağ modelindeki; *Ağ*, *HatSeti* ve *DüğümNoktası* sınıfları genişletilerek sırasıyla *TeknikAltyapıAğı* (*UtilityNetwork*), *TeknikAltyapıHatDizisi* (*UtilityLinkSet*) ve *TeknikAltyapıDüğümNoktası* (*UtilityNode*) soyut sınıfları türetilmiştir. Ayrıca ağ modelinde bulunmayan teknik altyapı düğüm noktalarını temsil etmek için *TeknikAltyapıDüğümNoktasıTaşıyıcı* (*UtilityNodeContainer*) sınıfı ile profildeki tüm sınıflara ait öz nitelikleri içeren soyut *TeknikAltyapıAğElemanı* (*UtilityNetworkElement*) sınıfı eklenmiştir. Bu öz nitelikler, tesisin durumu, zamansal özellikleri, zemine göre düşey konumu gibi özellikleri içerir. Birden fazla teknik altyapı ağında mevcut olabilen (ortak) tesisler, bu soyut sınıfların genişletilmesiyle oluşturulan sınıflarla temsil edilmektedir. Bu ortak tesisler; (1) düğüm noktaları olan *Donatı* (*Appurtenance*), (2) düğüm noktası taşıyıcıları olan *Kabin* (*Cabinet*), *Direk* (*Pole*), *Kule* (*Tower*) ve *Menhol* (*Manhole*) ile (3) teknik altyapı hat dizileri olan *Kanal* (*Duct*), *Kablo* (*Cable*) ve *Boru* (*Pipe*) sınıflarında temsil edilmektedir (Şekil 1b).



Şekil 2: INSPIRE elektrik ve petrol, gaz, kimyasal ağlar uygulama şemalarının türetilmesi

Ortak altyapı ağları uygulama şemasında yer alan Kablo ve Boru sınıfları; (1) elektrik, (2) petrol, kimyasal ve doğal gaz, (3) su, (4) kanalizasyon, (5) termal ve (6) elektronik haberleşme türündeki ağlar için genişletilmiş ve her bir ağ için ayrı uygulama şemaları sunulmuştur. Örneğin, *ElektrikAğı* (*ElectricityNetwork*) uygulama şemasında elektrik kablolarına özgü işletme gerilimi ile nominal gerilim özellikleri, kablo sınıfından türetilen *ElektrikKablo* (*ElectricityCable*) sınıfı ile temsil edilmektedir (Şekil 2). Benzer şekilde, *PetrolGazKimyasalAğBorusu* (*OilGasChemicalsPipe*), ortak altyapı elemanı olan Boru sınıfından türetilmiştir. Ağlarda nokta özelliği gösteren tesisler, hem ortak altyapı ağları uygulama şemasında hem de sektörel şemalarda *Donatı* (*Appurtenance*) sınıfında yer almaktadır. Donatı sınıfı, donatı tipini ifade eden özniteliklere sahiptir; bu özniteliklerin değerleri her şema için geliştirilen değer listelerinden (örneğin, *ElectricityAppurtenanceTypeValue*) derlenir.

INSPIRE-UN modeli, teknik altyapı tesislerini 2 boyutlu modellemektedir. Yükseklik, derinlik bilgisi modelde yer almamaktadır. INSPIRE-UN spesifikasyonu veriyi mümkün olduğunca kapsamlı ve yüksek çözünürlükte (detay düzeyinde) tutmayı amaçlamış, ama gerektiğinde (ulusal ve Avrupa düzeylerindeki veri paylaşımı) detay düzeyinin azaltılmasına ve geometrinin basitleştirilmesine olanak tanımıştır (INSPIRE, 2013, s. 56).

2.1.1 INSPIRE-UN Modelinin Uygulamaları

Kablo ve Boru Hatları Bilgi Modeli (Informatiemodel Kabels en Leidingen, IMKL): Hollanda'da Kablo ve Boru Hatları Bilgi Merkezi (Kabels en Leidingen Informatie Centrum, KLIC), altyapı inşaatları sırasında meydana gelebilecek hasarların engellenmesi için kuruluşlar arasında çevrim içi veri değişimini sağlamayı amaçlayan ulusal düzeyde faaliyet gösteren bir merkezdir¹. Çevrim içi KLIC portalı veri değişiminin vektörel formatta ve standart bir şemaya uygun biçimde gerçekleştirilmesini sağlayarak veri değişim sürecini iyileştirmek için Hollanda ulusal haritacılık ve kadastro kurumu olan Kadaster tarafından geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Bir bölgede kazı yapmayı planlayan kişilerin bu merkeze başvurmaları ve planlanan çalışma bölgesinde faaliyet gösteren teknik altyapı kuruluşlarının konumsal verilerini merkez aracılığıyla paylaşmaları zorunlu tutulmuştur. Veri paylaşımında IMKL (Informatiemodel Kabels en Leidingen) uygulama şeması kullanılmaktadır. IMKL, ulusal coğrafi veri standartları kurumu olan Geonovum tarafından ulusal mevzuat

¹ <https://www.kadaster.nl/zakelijk/registraties/landelijke-voorzieningen/klic>

hükümlerine uygun biçimde INSPIRE-UN veri teması temel alınarak geliştirilmiştir (van den Brink, Janssen, & Quak, 2017). Teknik altyapı kuruluşları tarafından IMKL şemasına uygun olarak üretilen GML formatındaki veriler, KLIC-viewer yazılımı aracılığıyla görüntülenebilmektedir².

IMKL modeli, (1) planlanan inşaat çalışmasında alınması gereken güvenlik önlemleri, taraflara ilişkin veriler, çalışma bölgesinin sınırları, planlanan kazı tarihi ve süresi gibi inşaat sürecine ilişkin veriler, (2) INSPIRE-UN modeli tarafından sunulan teknik altyapı tesislerine ait 2 boyutlu coğrafi veriler ve öznitelik verileri ve (3) INSPIRE-UN modelinde kapsam dışı tutulan teknik altyapı tesislerine ait derinlik verisi ve özellikleri ile 3 boyutlu temsile yönelik tanımlamalar içermektedir. Model 3 boyutlu temsil için harici belgelerin eklenmesine de olanak vermektedir (Geonovum, 2015). Ribberink (2017), IMKL modeline ait bazı sınıfları kullanarak bir veri tabanı oluşturmuş, verilerin web sunucusu üzerinden paylaşımına olanak veren bir uygulama aracılığıyla; (1) kavşak inşaatı, (2) müşteri bağlantılarının kurulması ve (3) arıza ve onarım süreçlerinde inşaatçılar ile teknik altyapı kuruluşları arasındaki veri değişimi için IMKL modelinin kullanılabilceğini göstermiştir.

Star-DT: Fransa’da teknik altyapı çalışmaları sırasında insanların ve çevrenin korunması ile teknik altyapı hizmetlerinin kesintisiz sağlanması, teknik altyapı çalışmalarında koordinasyonunun sağlanması için Ulusal Coğrafi Bilgi Konseyi (Conseil National de l’Information Geographique-CNIG) tarafından Star-DT adı verilen bir coğrafi veri modeli geliştirilmiştir. Bu model, INSPIRE-UN modeli ile Hollanda tarafından kullanılan IMKL modeli temel alınarak Fransa’daki uygulama gereksinimleri doğrultusunda, ölçme yöntemi, derinlik bilgileri, konum doğruluğu, proje yönetimi, kazı güvenliği tedbirleri gibi bilgileri temsil edecek biçimde geliştirilmiştir³.

Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) Altyapı Ağları Veri Teması: Türkiye’de ulusal coğrafi bilgi altyapısı kurulmasına yönelik çalışmalar, 1 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi gereği Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü (CBSGM) tarafından yürütülmektedir. Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi Altyapısının Kurulumu (TUCBS) Projesi, ülkemizde INSPIRE Direktifine uygun coğrafi bilgi sistemi altyapısı kurulmasını, kamu kuruluşlarının sorumlu oldukları verilerin paylaşımına yönelik standartlar belirlemeyi amaçlamaktadır. Proje kapsamında 32 veri teması belirlenmiş; teknik altyapı ağları dahil olmak üzere 20 temaya ait coğrafi veri şeması üretilmiştir. Teknik altyapı tesislerine yönelik uygulama şemaları, (1) ortak ağ elemanları, (2) elektrik ağları, (3) petrol/gaz/kimyasal ağları, (4) atık su ağları, (5) su ağları, (6) elektronik haberleşme ağları, (7) termal ağlar olmak üzere yedi uygulama şemasını içermektedir⁴.

Uygulama şemaları, INSPIRE uygulama şemaları ve teknik altyapı kuruluşları temsilcilerinin görüşleri temel alınarak geliştirilmiştir. Şemalar, teknik altyapı tesislerinin fiziksel ve konumsal özellikleri, verilerin konumsal doğruluğu gibi öğeleri içermekte, ayrıca kartografik gösterimlerine yönelik kurallar sunmaktadır. Uygulama şemalarının; altyapı kaynaklarının planlanması, su kaynaklarının yönetimi, arazi kullanımı, kıyı alanlarının yönetimi, tehlikeli atıkların yönetimi, ulusal çevre eylem planlarının hazırlanmasında kullanımı öngörülmüştür (CBSGM, 2020).

2.2 CityGML Teknik Altyapı Ağları Uygulama Uzantısı

CityGML, 3 boyutlu kent modeli verilerinin saklanması ve değişimi/transfere için XML tabanlı bir format sağlayan açık bir veri modelidir. 2012 yılında bir OGC standardı olarak yayımlanan 2.0 versiyonu, GML3 (GML 3.1.1) için bir uygulama şeması sunmaktadır. 3 boyutlu kent nesnelere ait semantik ve konumsal bilgilerin çeşitli detay düzeylerinde temsili, ayrıca farklı uygulamalar arasında paylaşımını destekler. Model; bina, köprü, kent mobilyası, arazi kullanımı, su kütleleri, tüneller gibi 13 kent nesnesi temasına ait sınıflar içermektedir. Teknik altyapı tesisleri, standardın mevcut versiyonunda veya

² <https://www.klicviewer.nl/klic-viewer/>

³ http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2019/11/CNIG_STAR-DT_v1.0.pdf

⁴ <https://cbs.csb.gov.tr/cografii-veri-temalari-uygulama-semalari-i-86098>

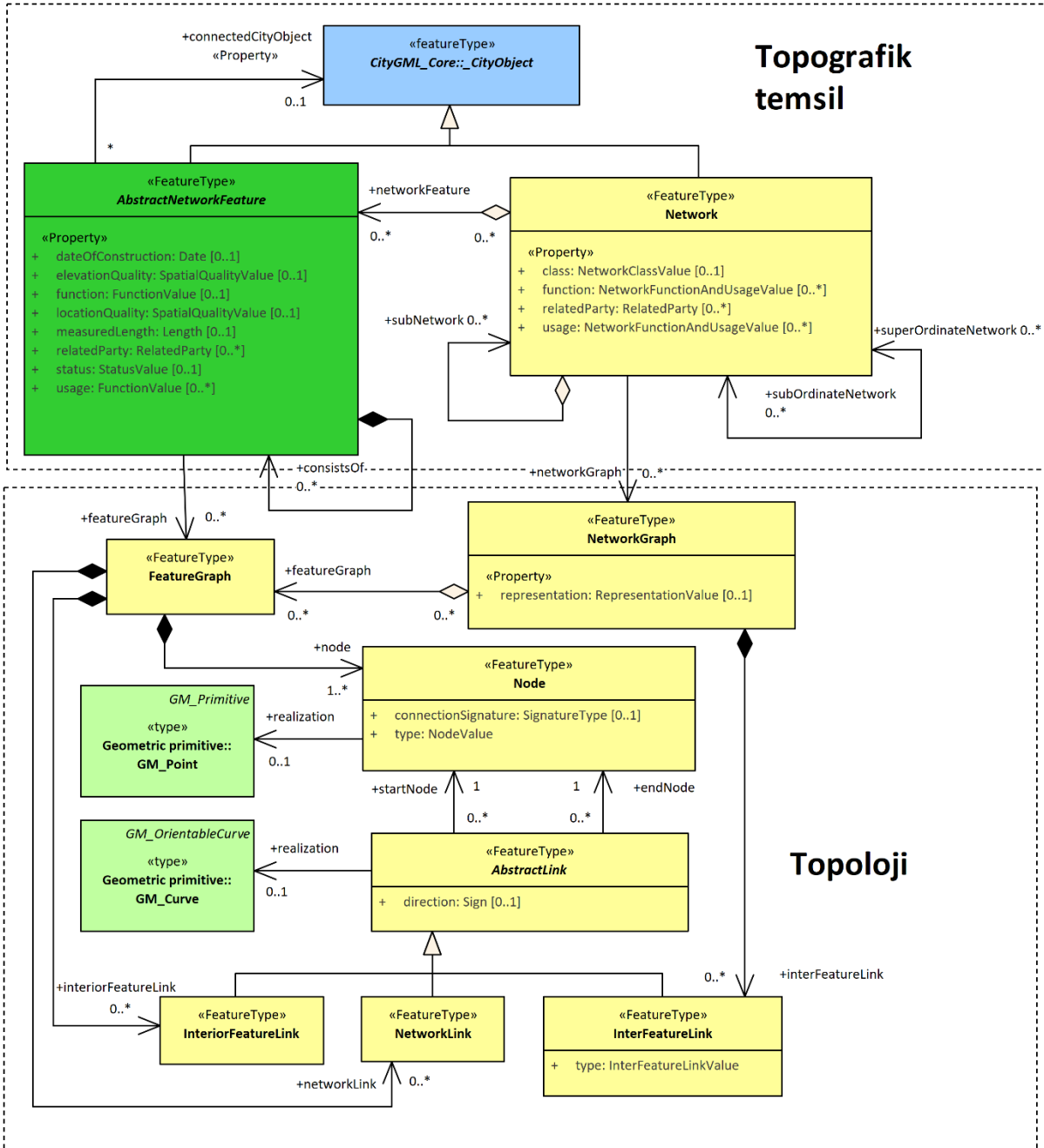
geliştirilmekte olan 3.0 versiyonunda yer almamaktadır (Kutzner, Chaturvedi, & Kolbe, 2020). Ancak, CityGML'de kapsam dışı tutulan farklı alanlara özgü bilgiler, tanımlanmış sınıfların genişletilmesiyle veya CityGML şema tanımlamalarını temel alan yeni formel XML şemaların geliştirilmesiyle oluşturulan uygulama uzantılarıyla (Application Domain Extension - ADE) modellenabilmektedir (Kolbe, 2009; van den Brink, Stoter, & Zlatanova, 2013). Biljecki, Kumar ve Nagel (2018), yayımlanmış 44 farklı uygulama uzantısı bulunduğunu belirlemiştir.

Teknik Altyapı Ağları Uygulama Uzantısı (Utility Network ADE, UNADE), teknik altyapı tesislerine ait bilgilerin CityGML formatındaki kent nesneleriyle entegre bir biçimde temsil edilmesini sağlayan bir uygulama şemasıdır. Başlangıçta afet durumlarında teknik altyapı tesislerinin birbirlerine ve diğer kent nesnelere etkilerinin simüle edilmesi hedeflenmiş, bu doğrultuda teknik altyapı tesislerinin karşılıklı bağımlılıklarını temsil eden 3 boyutlu bir ağ yapısı önerilmiştir (Becker, Nagel, & Kolbe, 2011). Ardından uygulama uzantısı teknik altyapı nesne ile ağlarının fiziksel (Becker, Nagel, & Kolbe, 2013) ve işlevsel özelliklerinin temsil edilmesine olanak verecek biçimde güncellenmiştir (Kutzner & Kolbe, 2016). Halen geliştirilmekte olan modele GitHub deposundan erişilebilmektedir⁵.

UNADE'nin özünü oluşturan ağ yapısı, teknik altyapı tesislerinin hem detaylı 3 boyutlu geometrileriyle topografik hem de 2 boyutlu (*GM_Point* ve *GM_Curve* temel tipleriyle) topolojik yapıda temsilini sağlamaktadır (Şekil 3). *Ağ (Network)* sınıfı topografik, *AğGrafi (NetworkGraph)* sınıfı ise topolojik biçimde temsil edilen ağları ifade eder. *SoyutAğDetayı (AbstractNetworkFeature)* nesneleri birleşerek *Ağ* nesnelere, *DetayGrafi (FeatureGraph)* nesnelere ise *AğGrafi* nesnelere oluşturur.

AğGrafi, *DüğümNoktası (Node)* ve *Bağlantı (AbstractLink)* nesnelere oluşur. Burada bağlantılar; (1) farklı türdeki veya hiyerarşideki ağlar (örneğin, iletim hattı ve dağıtım hattı) arasında, (2) aynı tür ağda farklı nesnelere (ör., boru-vana-boru) arasında ya da (3) bir nesnenin başlangıç ve sonu arasında yer alabilir. Bu bağlantılar sırasıyla *AğBağlantısı (NetworkLink)*, *DetaylarArasıBağlantı (InterFeatureLink)* ve *DetayİçBağlantısı (InteriorFeatureLink)* sınıflarıyla temsil edilir (Şekil 3).

⁵ <https://github.com/TatjanaKutzner/CityGML-UtilityNetwork-ADE/>



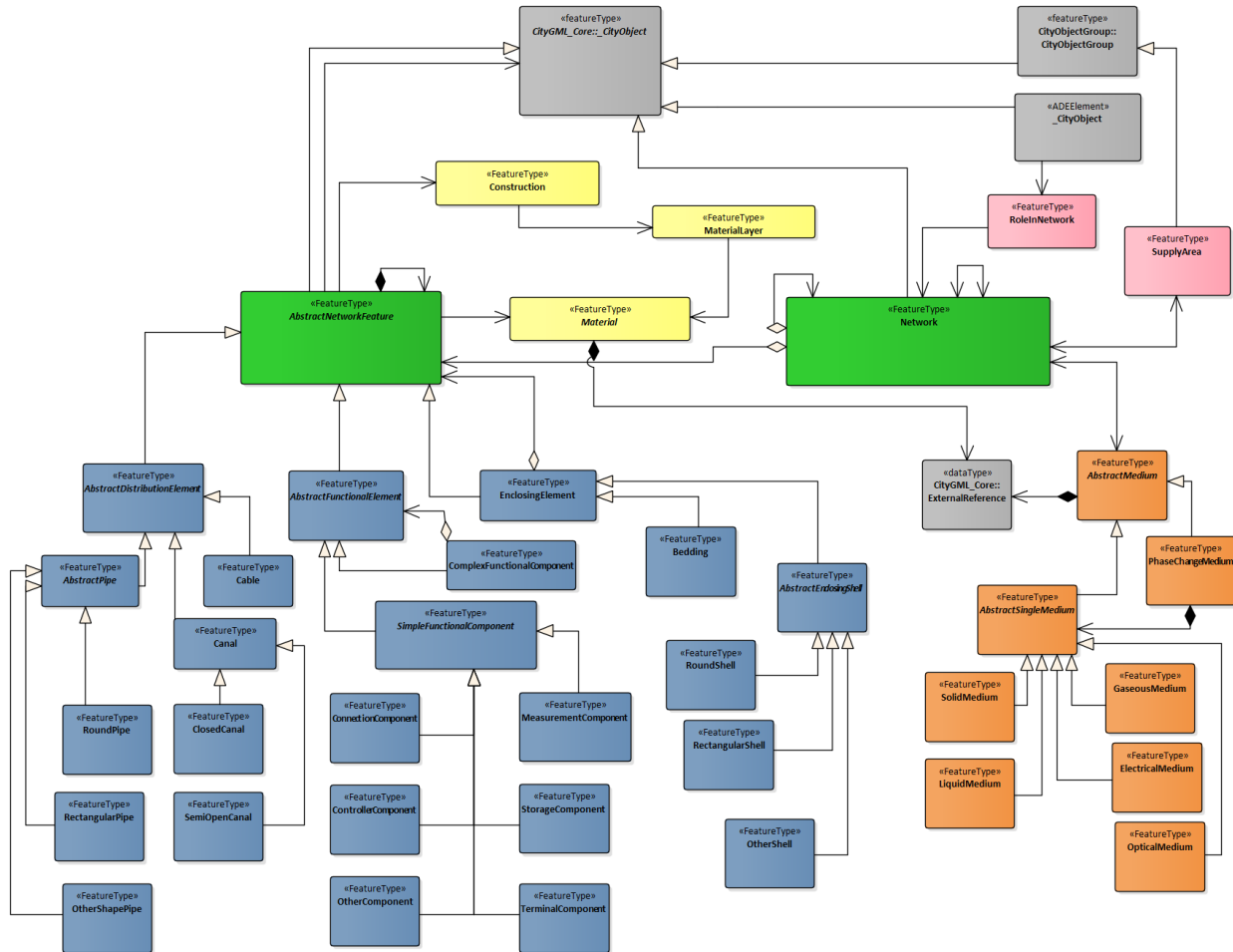
Şekil 3: UNADE ağ modeli ve topoloji temsili

UNADE, ağ modeliyle ilişkili dört farklı modül içermektedir. Bunlar; (1) ağ bileşenleri, (2) ağ özellikleri, (3) malzeme özellikleri ve (4) işlevsel özelliklerdir. Şekil 4'te bu modüllere ait sınıflar sırasıyla mavi, turuncu, sarı ve pembe renkler ile gösterilmektedir.

Ağ bileşenleri modülünde altyapı ağlarını oluşturan elemanların/tesislerin ölçü, eğim, şekil özellikleri, konumu, konum doğruluğu, ilgili kurum, kullanım durumu gibi genel topografik ve işlevsel özellikleri tanımlanır. Ağ bileşenleri; (1) boru, kanal kablo gibi dağıtım tesisleri; (2) depolama, ölçme, izleme, kontrol gibi görevleri bulunan, menhol, vana, transformatör gibi işlevsel elemanları ile (3) tesisleri çevreleyen ve koruyan yapıları içerir. Teknik altyapı tesisleri ve bileşenleri ayrı ayrı, bu soyut sınıflardan türetilen alt sınıflarla tanımlanır (Şekil 4). Bu sınıfların tamamı, *SoyutAğDetayı* (*AbstractNetworkFeature*) sınıfının alt sınıflarıdır. Ağ bileşenleri böylelikle farklı geometri özellikleriyle temsil edilebilir (Şekil 5), birleşerek bir teknik altyapı ağını oluşturabilir, aynı zamanda topolojik bir yapıda tanımlanabilir (Şekil 3).

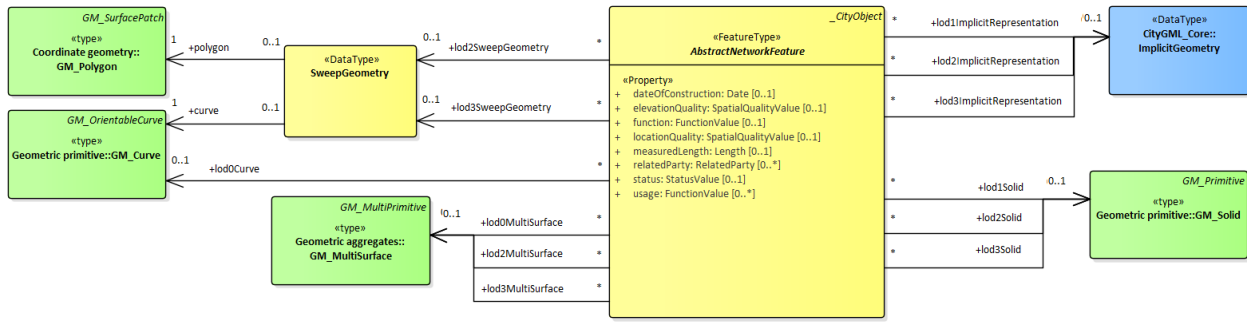
Altyapı ağlarının uç noktaları olan aydınlatma direği, yangın musluğu vb. gibi nesnelere UNADE modelinde yer almamaktadır. Bu nesnelere, CityGML’de kent mobilyaları ile temsil edilir. Teknik altyapı tesislerinin kent nesneleriyle ilişkileri, *SoyutAğDetayı* sınıfı ile CityGML modelinde herhangi bir kent nesnesinin tanımlandığı *KentNesnesi* (*_CityObject*) sınıfı arasındaki ilişkiyle sağlanmaktadır.

Ağ özellikleri modülü, teknik altyapı tesisleri tarafından taşınan maddeler ile maddelerin sıcaklık, yoğunluk, basınç, iletkenlik, yanıcılık gibi özelliklerini ifade etmektedir. Bu nesnelere, *Ağ* (*Network*) sınıfı ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4: UNADE modülleri. Mavi renk ağ bileşenlerine, turuncu renk ağ özelliklerine, sarı renk malzeme özelliklerine, pembe renk işlevsel özelliklere ait sınıfları göstermektedir

Ağ bileşenlerinin iç ve dış katmanlarının yapım ve malzeme özellikleri, malzeme modülünde *Yapı* (*Construction*), *MalzemeKatmanı* (*MaterialLayer*) ve *Malzeme* (*Material*) sınıflarıyla temsil edilir.



Şekil 5: UNADE modelinde ağ bileşen geometrileri

İşlevsel özellikler modülü, altyapı tesislerinin ve ağlarının işlevleri ile hizmet sundukları bölgeleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Bir teknik altyapı ağının beslediği alan, *Besleme Alanı (Supply Area)* sınıfı ile temsil edilebilir. Bu sınıf, CityGML modelinde yer alan *Kent Nesne Grubu (CityObjectGroup)* sınıfının alt sınıfıdır. Böylelikle, bir ağın beslediği bölge kent ile ilişkilendirilebilmektedir. Bu ilişki, işletme sürecindeki olası hizmet kesintilerinden etkilenecek nüfus, yapı ve bölgelerin belirlenmesini sağlar (Kutzner & Kolbe, 2016).

Altyapı tesisleri ile kent nesnelere ve bunların arasındaki ilişkileri temsil etmek, farklı kullanım durumlarının gerektirdiği coğrafi analizleri yapabilmek için coğrafi veri yönetim sistemlerine gereksinim duyulur. CityGML formatındaki verilerin yönetimi için geliştirilmiş bir veri tabanı şeması sunan 3DCityDB (Yao vd., 2018), UNADE için de kullanılabilir (Boates, Aguiaro, & Nichersu, 2018). Örneğin, den Duijn, Aguiaro, ve Zlatanova (2018); teknik altyapı tesisleri ile kent nesnelere arasındaki ilişkileri temsil etmek üzere Rotterdam şehrindeki alçak gerilimli elektrik hatları ile su şebekesine ait yer altındaki kablo ve borular için ADE sınıflarını, yer üstündeki direkler ve menholler için ise CityGML sınıflarını kullanarak bir veri tabanı oluşturmuş, böyle bir yaklaşımla 3 boyutlu altyapı ağ analizlerinin 3 boyutlu kent modelleri kapsamında gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. Benzer biçimde, Boates vd. (2018) su dağıtım şebekesine ait coğrafi verileri CityGML verileriyle entegre ederek, toplam şebeke hacminin hesaplanmasını ve depolar ile binalar arasında güzergah analizlerini gerçekleştirmiş; Vishnu ve Saran (2018), su dağıtım şebekesi elemanlarının devre dışı kalması halinde etkilenen bölgeleri ve teknik altyapı tesislerinin buldukları yol alanlarını sorgulayarak belirlemiştir.

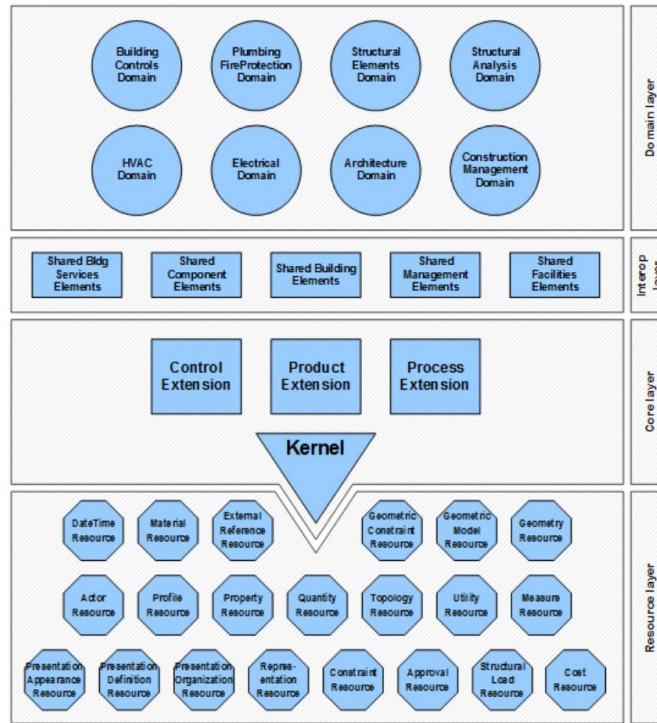
Ayrıca, modelin işlevselliğini artırmak amacıyla genişletilmesini öneren kimi çalışmalar bulunmaktadır. Fossatti, Aguiaro, olde Scholtenhuis ve Dorée (2020), farklı sektörlere ait tesislerin bakım ve onarım faaliyetlerinde bu modelin genişletilerek kullanılabilmesini ortaya koymuştur. olde Scholtenhuis, den Duijn, ve Zlatanova (2018), kablo ve boru gibi dağıtım tesislerine ait coğrafi veri kalitesinin (konum doğruluklarının) modele dahil edilmesi için bir eklenti önermiş, böylelikle tesislerin konum belirsizlikleriyle beraber görselleştirilebilmesini sağlamıştır.

2.3 Endüstri Temel Sınıfları

Endüstri Temel Sınıfları (Industry Foundation Classes, IFC); tasarım, inşaat, tedarik ve bakım işlemleri gibi süreçlerde kullanılan Yapı Bilgi Modelleme (Building Information Modeling, BIM) sistemlerine ait verilerin farklı kullanıcı ve yazılımlar arasında paylaşımı için buildingSmart tarafından geliştirilmiş bir standarttır. IFC, ayrıca bir ISO (16738:2018) standardıdır. Çoğunlukla mimarlık, mühendislik ve inşaat sektörlerinde veri değişimi için kullanılmaktadır. IFC, ISO:10303-11 standardında tanımlanan EXPRESS modelleme dilinde ve XML şema tanımlama dilinde sunulmakta, birçok yazılım tarafından desteklenmektedir. Veri değişiminde genellikle model görünüm tanımlamaları (Model View Definition, MVD) kullanılır. Bunlar, çok kapsamlı ve karmaşık bir yapıya sahip olan IFC modelinin, yalnızca gereksinim duyulan verilerin değişimi için oluşturulmuş alt kümeleridir.

IFC’de yapıların kendilerini meydana getiren elemanları ile bu elemanların boyut, malzeme, fiyat gibi özellikleri kaydedilir. Yapıların içindeki ve buldukları arazideki teknik altyapı tesislerinin iki ve üç boyutlu temsilini destekler.

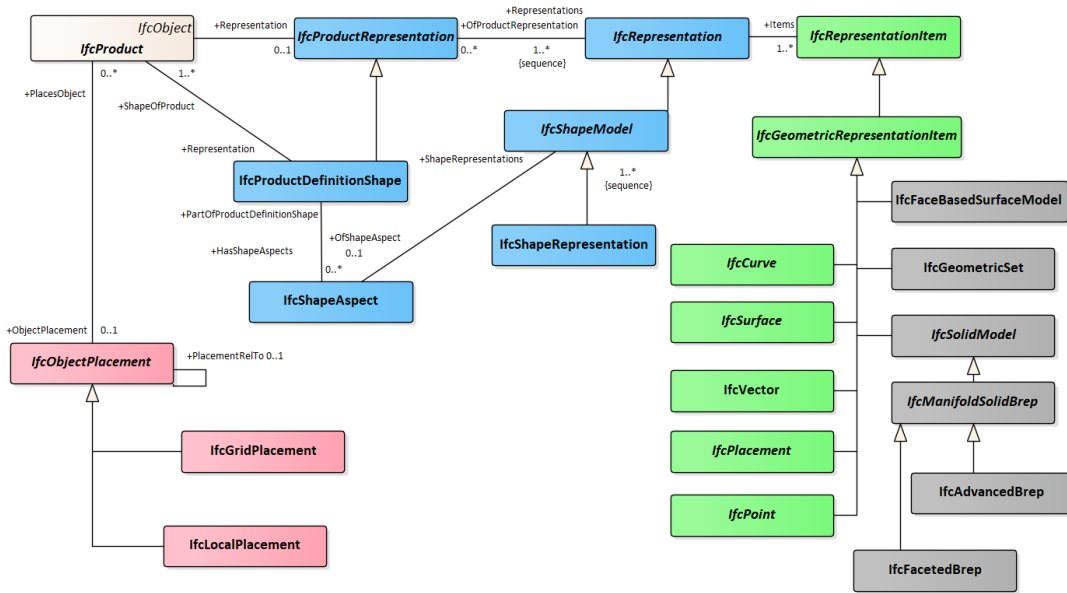
IFC modeli, bir dizi (alt) şemadan oluşur ve her şema kavramsal bir katmana aittir (Şekil 6). Bu katmanlar; (1) kaynak tanımlama katmanı (resource layer), (2) öz katman (core layer), (3) birlikte çalışabilirlik katmanı (interoperability layer) ve (4) alan katmanıdır (domain layer).



Şekil 6: IFC'de tanımlanan kavramsal katmanlar ile şemalar (buildingSMART, 2018a)

1) Kaynak tanımlama katmanı, tüm şemalarda kullanılacak temel kavramları ve genel (jenerik) öğeleri içerir (buildingSMART, 2018b). Bu katmandaki öğeler tek başlarına kullanılamaz ve genellikle diğer katmanlardaki nesnelere değer tipleri olarak tanımlanır. Burada, kaynak olarak tanımlı tiplerin bazıları; geometri (geometry resource, geometric model resource) ve topoloji (topology resource) ile ölçü birimleri (measure resource) türleridir.

IFC şemasındaki geometri tipleri ISO 10303-42 standardında tanımlanmıştır. Bu tipler, nesnelere 2 (eğri: *IfcCurve*, yüzey: *IfcSurface* vb.) ve 3 boyutlu (katı cisim modeli: *IfcSolidModel*) biçimde tanımlanmasına olanak verir. Şekil 7’de mavi, pembe, yeşil ve gri renkleri sırasıyla, kaynak tanımlama katmanında yer alan *TemsilKaynağı* (*IfcRepresentationResource*), *GeometrikSınırlamaKaynağı* (*IfcGeometricConstraintResource*), *GeometriKaynağı* (*IfcGeometryResource*), *GeometrikModelKaynağı* (*IfcGeometricModelResource*) şemalarına ait sınıfları göstermektedir. *TemsilKaynağı*, nesnelere şekilsel ve topolojik özelliklerini tanımlar. *GeometrikSınırlamaKaynağı*, temsil edilen nesnelere konumlandırılması için gereken kaynakları belirtir. *GeometriKaynağı*, nesne geometrilerinin temsili için kullanılan kaynakları tanımlar. Bu kaynaklar kullanılarak nesnelere şekilleri veya geometrileriyle temsil edilir. *GeometrikModelKaynağı* katı cisim veya yüzey modelleri gibi geometrik modelleri tanımlar.



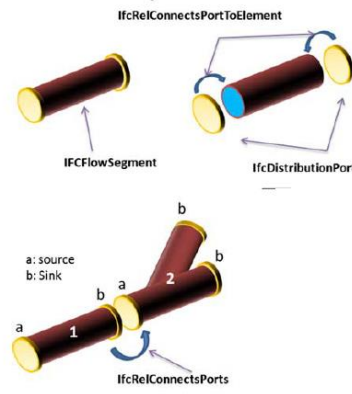
Şekil 7: IFC'de ürünlerin konumsal ve geometrik temsili

2) **Öz katman**, çekirdek (kernel) şema ile bunlardan türetilen; ürünlere, süreç yönetimine ve kontrole yönelik tanımlamaların temelini oluşturan, sırasıyla *IfcProductExtension*, *IfcProcessExtension* ve *IfcControlExtension* isimli şemaları kapsamaktadır (buildingSMART, 2018c).

Çekirdek şema, bütün öğeler için üst sınıf olan *IfcRoot* sınıfını içerir. *IfcRoot*, ürün ve süreç yönetimi gibi farklı alanlara ait nesnelerin genel tanımlarını içeren *NesneTanımlama (IfcObjectDefinition)* şeması ile genişletilmiştir. Bu şema ürün ve süreç yönetimi gibi farklı alanlara ait nesnelerin genel tanımlarını içerir. IFC'de ürün terimi, geometrik olarak temsil edilen ya da belirli bir konumda bulunan nesnelere için kullanılan genel bir kavramdır. Bu nesnelere, çekirdek şemada *Ürün (IfcProduct)* sınıfı ile ifade edilmektedir. Ürünlerin konumları, yerel veya küresel koordinat sisteminde ya da başka bir nesneye göre bağlı olarak, *NesneKonumlandırma (IfcObjectPlacement)* ile ifade edilebilmektedir. Şekil 7'de ürünlerin konumsal ve geometrik temsili için kullanılan sınıf ile ilişkiler gösterilmektedir. Geometrik olarak, temsil (representation) özelliği (özneliği) ile *ÜrünŞekilTanımı (IfcProductDefinitionShape)* tipinde tanımlanarak, aynı anda birden fazla şekilde temsil edilebilir.

Öz katmanda yer alan şemalardan biri olan *ÜrünEklentisi (IfcProductExtension)* çekirdek şemayı fiziksel nesnelere ilişkin sınıflarla genişletir. Yapıdaki fiziksel elemanlar bu şemada *Ürün (IfcProduct)* sınıfından türetilen *Eleman (IfcElement)* nesneleriyle ifade edilmektedir.

ÜrünEklentisi şeması teknik altyapı tesisleri için kullanılan *DağıtımElemanı (IfcDistributionElement)*, *BağlantıNoktası (IfcPort)* ve *Sistem (IfcSystem)* temel sınıflarını içermektedir. Bu sınıflar, bir alt katman olan birlikte çalışabilirlik katmanında detaylandırılmaktadır. *DağıtımElemanı*, ısıtma, havalandırma, iklimlendirme, sıhhi tesisat ve yangından korunma, elektrik, elektronik haberleşme alanlarındaki fiziksel teknik altyapı tesisleri için tanımlanmış soyut bir sınıftır. *BağlantıNoktası*, nesnelere arasındaki bağlantıları ifade eder. Elemanlar ve bağlantı noktaları arasındaki bağıllık, *BağlantıNoktasıElemanİlişkisi (IfcRelConnectsPortToElement)* ve *BağlantıNoktaİlişkisi (IfcRelConnectsPorts)* ilişki sınıfları ile temsil edilir (Şekil 8).



Şekil 8: IFC'de teknik altyapı tesis bağlantılarının gösterimi (Hijazi, Ehlers, & Zlatanova, 2012, s. 32)

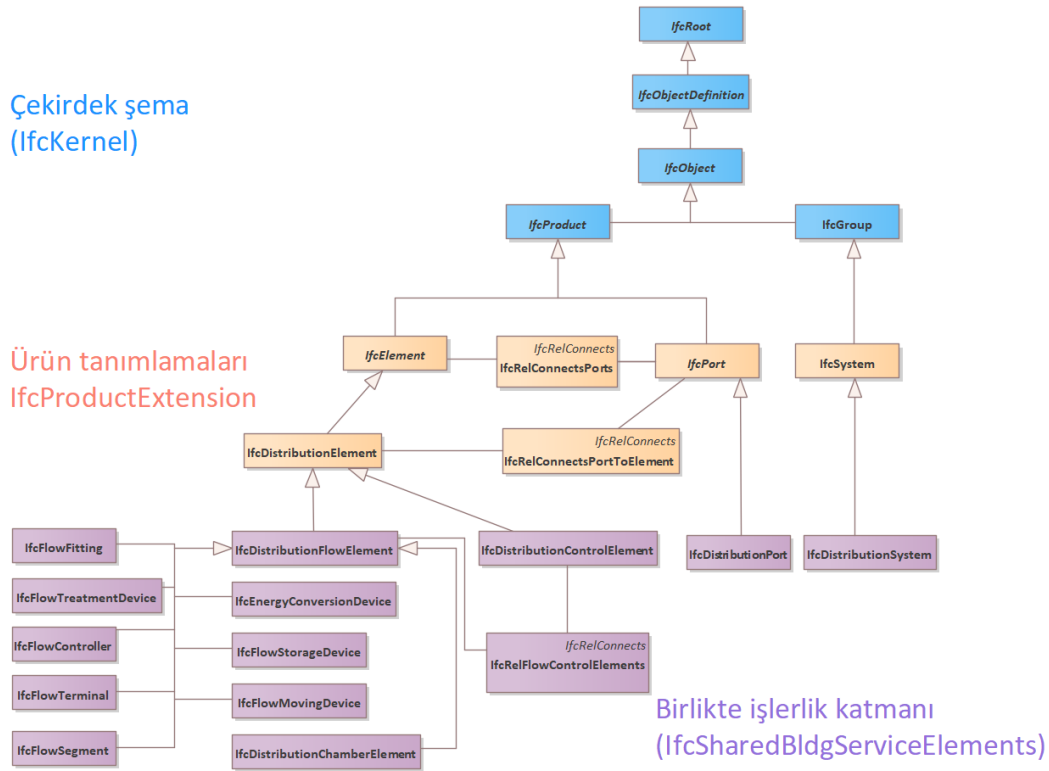
3) Birlikte çalışabilirlik katmanı, birden fazla disiplin tarafından kullanılan ve paylaşılan nesnelere içeren alt şemaları belirtir (buildingSMART, 2018d). Bu şemalarından biri olan, teknik altyapı tesislerinin temsil edildiği *PaylaşılanBinaHizmetElemanları* (*IfcSharedBldgServiceElements*), bina hizmetlerine yönelik disiplinler arasında birlikte çalışabilirliğin sağlanması için gereken temel tanımlamaları içermektedir. Burada bir üst katmanda yer alan (i) *DağıtımElemanı*, (ii) *BağlantıNoktası* ve (iii) *Sistem* sınıfları genişletilmektedir (Şekil 9):

i) Yapı içindeki teknik altyapı dağıtımına yarayan tesisler, *DağıtımElemanı* sınıfından türetilen *DağıtımAkışElemanı* (*IfcDistributionFlowElement*) sınıfı ve alt tipleri ile özelleştirilir (Şekil 9). Örneğin, *AkışDenetçisi* (*IfcFlowController*) ile vana veya anahtar gibi, madde ya da enerji akışını kontrol eden ve düzenleyen nesnelere ifade edilir. *AkışBölümü* (*IfcFlowSegment*), bir dağıtım sistemindeki boru veya kanal gibi elemanların genellikle düz ve iki ucu bulunan bir bölümünü ifade eder (Şekil 8). Ayrıca, kompresör, pompa gibi nesnelere akışını sağlayan tesisler (*IfcFlowMovingDevice*); tank gibi geçici depolama için kullanılan tesisler (*IfcFlowStorageDevice*); dirsek, manşon gibi bağlantı parçaları (*IfcFlowFitting*) temsil edilir. Bina otomasyon kontrol sistemlerine ait nesnelere *DağıtımKontrolElemanı* (*IfcDistributionControlElement*) ile tanımlanır.

ii) Teknik altyapı tesislerine özgü bağlantı noktaları, akış yönü ile birlikte *DağıtımBağlantıNoktası* (*IfcDistributionPort*) ile ifade edilir (Şekil 8).

iii) Ortak bir amacı yerine getiren ya da aynı tür bina hizmetinde kullanılan tesislerin oluşturduğu bir dağıtım sistemi *DağıtımSistemi* (*IfcDistributionSystem*) ile temsil edilir.

4) Alan katmanı, belirli disiplinlere özgü şemaları içermektedir. Bunlar; (1) ısıtma, havalandırma, iklimlendirme (*IfcHvacDomain*), (2) sıhhi tesisat ve yangından korunma (*IfcPlumbingFireProtectionDomain*), (3) elektrik (*IfcElectricalDomain*) ve (4) bina kontrol ve otomasyon sistemleri (*IfcBuildingControlsDomain*) için tanımlanmış şemalardır.



Şekil 9: IFC'de teknik altyapı tesislerine ilişkin sınıfların bir bölümünün UML gösterimi

IFC modeli, bina ve tesis yönetimine odaklanmakta, bu doğrultuda teknik altyapı tesislerinin kapsamı yapı içi ve buldukları arazi ile sınırlı kalmaktadır. Dağıtım ve iletim şebekelerine ait coğrafi verilerin yönetimi ve analizi için coğrafi bilgi sistemleri kullanılmaktadır. Yapı düzeyindeki teknik altyapı verilerinin coğrafi/kent bilgi sistemleriyle bütünleştirilerek coğrafi analizlerde kullanılmasını ve görselleştirilmesini sağlamak için BIM ve CBS modellerinin entegre edilmesi gerekmektedir (Cheng & Deng, 2015). Bu amaçla genellikle IFC ve UNADE modelleri eşleştirilmekte ve tümleşik modeller ile entegre edilmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalar, IFC şemasındaki teknik altyapı tesislerine ilişkin birçok nesnenin UNADE modeliyle veri kaybı olmadan eşleştirilebildiğini göstermiştir (Hijazi, Ehlers, Zlatanova, & Isikdag, 2009; Hijazi, Ehlers, Zlatanova, Becker, & Berlo, 2011; Hijazi vd., 2012).

Wang, Deng, Won ve Cheng (2019), IFC ve UNADE modellerini teknik altyapı şebekelerinin projelendirme, işletme ve bakım süreçlerindeki veri gereksinimleri doğrultusunda genişletmiş ve tümleşik bir model tasarlamıştır. Benzer şekilde Zhao, Liu ve Mbachu (2019) su dağıtım şebekelerinin planlanmasında; Lee, Wang, Lo ve Long (2018) ise altyapı tünellerinin bakım süreçlerinin yönetiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Gilbert, Barr, James, Morley ve Ji (2018), dağıtım ağlarındaki elektrik arz ve taleplerini, IFC ve UNADE modellerinde temsil edilen ağlar ile dinamik kaynak akışlarını gösteren gerçek zamanlı sensör verilerini kullanan bir sistem aracılığıyla görselleştirmiştir.

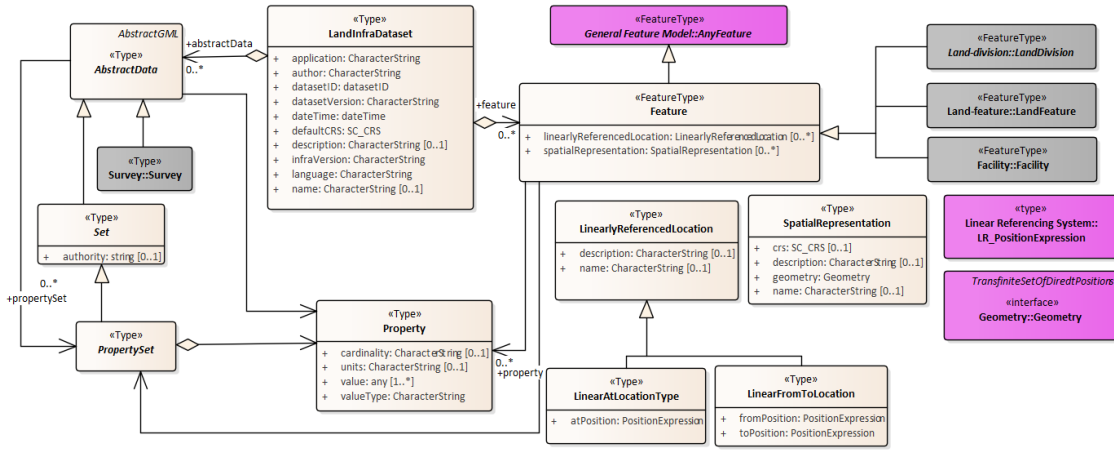
2.4 OGC LandInfra / InfraGML

2016 yılında OGC standardı olarak yayımlanan Arazi ve Altyapı Kavramsal Modeli (Land and Infrastructure Conceptual Model, LandInfra), inşaat mühendisliği altyapı tesislerine ve araziye ilişkin kavramlar ve kavramlar arasındaki ilişkileri tanımlayan, uygulamadan bağımsız bir model sunmaktadır (OGC, 2016). Model, karayolu, demiryolu, köprü gibi altyapı tesislerine ait projelendirme ve ölçme süreçlerindeki coğrafi veri yönetimini desteklemektedir. LandInfra, teknik altyapı tesislerinden yalnızca ıslak altyapılar olarak tanımlanan drenaj, su dağıtım ve atık su altyapı tesislerini içermektedir; ancak mevcut versiyonda bu sınıflar detaylandırılmamıştır. Elektrik, telekomünikasyon, doğal gaz gibi teknik altyapı tesislerine ait

projeler ile fiziksel bileşenler kapsam dışı tutulmuştur.

LandInfra’da birbirleriyle bağlantılı olan konular belirlenmiş ve kavramsal modelleri UML paketleri biçiminde sunulmuştur. Bunlar; *Öz (Core)*, *Tesis (Facility)*, *Proje (Project)*, *Gecki (Alignment)*, *Karayolu (Road)*, *Demiryolu (Railway)*, *Ölçme (Survey)*, *Arazi (LandFeautre)*, *AraziBölümü (LandDivision)*, *BinaBağımsızBölüm (Condominium)* paketleridir. 2017 yılında yayımlanan InfraGML standardı, LandInfra’da belirlenen sekiz temaya ait GML uygulama şemalarını (paketleri) tanımlamaktadır⁶. Modelin kapsadığı tesislere ait bileşenler *Tesis* paketinde; bunlara ait projelere ilişkin bilgiler *Proje* paketinde temsil edilmektedir. *Ölçme* paketi, ölçme cihazlarına, ham gözlemlere ve kestirimlere yönelik bilgilerin temsiline olanak verir. Fiziksel nesnelere bir doğrusal referans sisteminde konumlandırılması için gereken tanımlamalar *Gecki* paketinde sunulmaktadır. *AraziBölümü* paketinde, idari ya da mülkiyet durumuna göre bölümlendirilmiş araziler temsil edilmektedir.

Her uygulama şemasının LandInfra (öz model) gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir (OGC, 2017a). Şekil 10, bir LandInfra veri setinin (*LandInfraDataset*) tanımlayıcı bilgilerini, tüm paketlerde yer alan *Detay (Feature)* nesnelere ve soyut verileri (*AbstractData*) tanımlayan öz paketi göstermektedir.



Şekil 10: LandInfra öz paketi

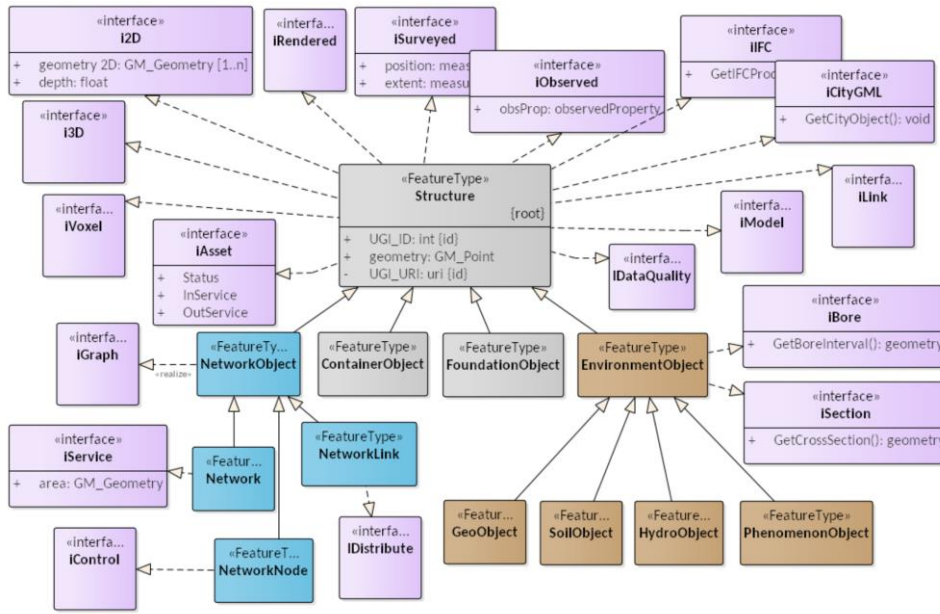
Detay sınıfı, gerçek dünya nesnelere (*feature*) temsil eden detayları kapsar. ISO 19109:2015 standardında tanımlanan ve tüm detay nesnelere için ortak bir sınıf olan *HerhangiBirDetay (AnyFeature)* sınıfından türetilmiştir. Detaylar, doğrusal referanslandırma kullanılarak (*linearlyReferencedLocation*) ve/veya coğrafi olarak koordinat ve geometrileriyle (*spatialRepresentation*) temsil edilebilir. Doğrusal referanslandırma için ISO 19148:2012 standardında tanımlanan konum ifadesi (*LR_PositionExpression*) kullanılmaktadır. Coğrafi temsil için, LandInfra ve InfraGML’in yayımlandığı tarihlerde taslak halde bulunan ISO 19107:2019 standardında yer alan geometri temelleri (primitive) kullanılmıştır.

Bir veri seti (*LandInfraDataSet*, *LandInfraVeriSeti*), tanımlayıcısı, versiyonu, tarihi, dili, uygulaması gibi özellikleri ile tanımlanır ve *Detay* ile *SoyutVeri* sınıflarından türetilen detay ve tanımlamaları içerir. Bu sınıflar ve *LandInfraVeriSeti* arasındaki toplama (aggregation) ilişkileri, farklı paketlere/temalara ait veri ve tanımlamaların aynı veri setinde yer almasına olanak verir.

⁶ <https://www.ogc.org/standards/infraGML>

ölçülebilmesi, sensör bilgileriyle ilişkilendirilebilmesi ve spesifik uygulamaların desteklenmesi için esnek bir yapıda tasarlanmıştır.

Modelin yayımlanan versiyonu, (1) rutin sokak kazıları, (2) büyük ölçekli inşaat projelerinin planlanması, tasarımı ve yapımı ile (3) afet planlama uygulamalarında/kullanım durumlarında yeraltı tesislerine yönelik gereksinim duyulan coğrafi verileri kapsar. Bu uygulamalar birbirlerinden farklı detay düzeyinde coğrafi verilere gereksinim duymaktadır. Modelin farklı kullanım durumlarının/uygulamalarının gerektirdiğinden daha detaylı ve karmaşık olmaması için modüler bir yapı benimsenmiştir. Bu doğrultuda modelde hem yeraltı ortamına ilişkin hem de gömülü teknik altyapı tesislerinin temel geometrik ve fiziksel özelliklerini içeren bir öz (core) model ve öz modeldeki sınıflarla ilişkili, isteğe bağlı olarak etkinleştirilebilen eklenti veya ara yüzler (interface) bulunmaktadır (Şekil 12).



Şekil 12: MUDDI öz modeli ve arayüzler. Eflatun renk arayüzleri, diğer renkler öz modele ait sınıfları göstermektedir (Lieberman, 2019)

Öz modelin olanak verdiği daha ayrıntılı geometrik ve işlevsel özelliklere ait bilgilerin bu arayüzler aracılığıyla ifade edilmesi öngörülmüştür. Arayüzler, öz modeldeki sınıflara yeni öznitelikler ve/veya işlemler eklemektedir. Örneğin, nesnelerin detaylı geometrileri *I2D*, *I3D* ve/veya *IVoxel* arayüzleriyle ifade edilmektedir. Çeşitli simülasyonlar için gerekli parametreler, *IModel* arayüzü ile eklenir. Tesislerin bakımına, konumlarının belirlenmesine ve veri kalitesine yönelik bilgiler, sırasıyla, *IAsset*, *ISurveyed* ve *IDataQuality* arayüzlerinin gerçekleştirilmesiyle ifade edilir. Bu modüler yapı, IFC veya CityGML gibi diğer veri modellerinden kavramların entegre edilmesine olanak verir. *ICityGML* ve *IIFC* arayüzlerinde, CityGML ve IFC formatındaki verilerin kullanımı için gereken işlemler (*GetCityGML*, *GetIFC*) belirtilmektedir.

Öz model; (1) yeraltına ilişkin yapısal özellikleri, (2) ağ biçiminde temsil edilen teknik altyapı nesnelere (3) muhafaza elemanlarını, (4) destekleyici elemanları ve (5) yeraltı ortamına ait özellikleri temsil eden beş temel sınıf içermektedir. *Yapı* (*Structure*) sınıfı; tanımlayıcı, şekil, renk, malzeme, durum gibi, tüm yeraltı nesnelere ait ortak özellikleri içermektedir (Şekil 12).

AğNesnesi (*NetworkObject*), teknik altyapı ağları için temel sınıftır; *Ağ* (*Network*) ile ağ oluşturulan *DüğümNoktası* (*NetworkNode*) ve düğüm noktalarını bağlayan *AğBağlantısı* (*NetworkLink*) nesnelere temsil eden alt sınıfları içerir. Ağlarda yer alan kontrol ve denetim elemanlarına ilişkin öznitelikler *IControl* ve *IDistribute* arayüzlerinin gerçekleştirilmesi

ile eklenir. Bu öznitelikler, düğüm noktasının kaynak noktası, nihai nokta, açık veya kapalı olma durumu, ya da kenar/hattın akış yönü, hızı vb. olabilir. Bir ağın ya da ağ bileşeninin etkin olduğu bölgeyi temsil etmek için *IService* arayüzü kullanılmaktadır.

MUDDI modeli, halen Amerika İnşaat Mühendisleri Birliği tarafından geliştirilen ve endüstri standardı olarak yayımlanması beklenen taslak *as-built* standardında (teknik altyapı verilerinin kaydedilmesi ve değişimi - Recording And Exchanging Utility Infrastructure Data) (ASCE, 2018) belirtilen veri gereksinimlerini karşılayacak biçimde geliştirilmekte ve modele tesislerin ölçme, konum doğruluğu, veri kalitesi, malzeme kapasite gibi özellikleri dahil edilmektedir (Lieberman & Roensdorf, 2020). MUDDI modelinin güncel versiyonuna GitHub deposundan⁷ erişilebilmektedir.

3. Değerlendirme

3.1 Modellerin İçeriği ve Kapsamı

Bu çalışmada incelenen coğrafi veri modelleri farklı kullanım alanlarına yöneliktir. Bu doğrultuda gerçek dünyadaki teknik altyapı tesis ve ağları farklı şekillerde soyutlanmış, modeller farklı bakış açılarıyla tasarlanmıştır. Modellerin tasarım amaçları; içeriklerini, detay düzeylerini ve nesnelerin temsil biçimlerini doğrudan etkilemektedir.

INSPIRE Teknik Altyapı Ağları veri şemasının amacı, farklı kuruluşların yönettiği değişken yapıda ve düzeyde bulunan veri ve veri modellerinin uyumlandırılmasını sağlamak, teknik altyapı kuruluşları arasındaki verinin yeniden kullanımını ve paylaşımını etkinleştirmektir. Bu doğrultuda teknik altyapı tesisleri; elektrik, petrol, gaz ve kimyasallar, su, atık su ve telekomünikasyon gibi sektör türleri esas alınarak ayrı paketlerle temsil edilmiştir.

UNADE, kritik altyapıların karşılıklı bağımlılıklarını kent modelleriyle bütünleşik biçimde temsil eder. Bu nedenle, teknik altyapı hatlarının ilettiği malzeme tiplerini temel alan bir sınıflandırma yaklaşımı benimsenmiştir. Ağlar, INSPIRE modelindeki gibi teknik altyapı sektörlerini esas almaz; aksine aynı tür maddeyi taşıyan teknik altyapı tesislerinin bir ağ oluşturduğu düşünülür. Modelleme yaklaşımı, teknik altyapı tesislerinin fiziksel özellikleri, ilettikleri maddeler ile işlevlerine odaklanırken, sahipleri ve sektörleri ikincil düzeyde önemlidir.

IFC, yapılarla ait proje yönetimine odaklanmaktadır; bu nedenle bina içlerinde ve binaların buldukları arazideki ısıtma, soğutma, havalandırma, sıhhi tesisat, elektrik, elektronik, haberleşme gibi teknik altyapı tesislerini temsil eder.

MUDDI, yer altı teknik altyapı tesislerine ait farklı veri modellerine uygun biçimde üretilmiş veri setlerini bütünleştirerek işlevselliğini artırmayı hedeflemekte, bu doğrultuda bir çerçeve sunmaktadır. Öz modelde, teknik altyapı tesislerinin temsili için temel özellikler yer almaktadır. Sektörlere özgü modellerin ara yüzler aracılığıyla eklenmesi öngörülmüştür.

LandInfra kavramsal modeli ve InfraGML uygulama şeması, inşaat mühendisliği ve altyapı projeleri ile araziye odaklanmaktadır. Teknik altyapı tesisleriyle ilgili olarak yalnızca ıslak altyapılar olarak tanımlanan, drenaj, su dağıtımı ve atık su altyapı tesislerine ait sınıfları içerir. Ancak bu sınıflar, standardın mevcut versiyonunda detaylandırılmamıştır. Elektrik, telekomünikasyon, doğalgaz gibi teknik altyapı tesislerine ait projeler ile fiziksel bileşenleri kapsam dışı tutulmuştur.

⁷ <https://github.com/opengeospatial/muddi>

Tablo 1: Modellerin geometrik temsillerinin karşılaştırılması

	INSPIRE-UN	CityGML UNADE	InfraGML	IFC	MUDDI
Modelleme amacı	Çevresel uygulamalar için coğrafi veri değişimi	Kent modelleriyle entegre biçimde coğrafi analizler	Mühendislik altyapılarının proje, tasarım, inşa vb. süreçlerinde veri değişimi	Mimarlık, inşaat ve tesis yönetimine ilişkin taraflar arasında veri değişimi	Yeraltı ortamına ilişkin verilerin entegrasyonu için çerçeve sunma
Yatay konumsal kapsam	Kent/ülke/bölge	Kent, bina	Kent, bina, bölge	Bina, proje alanı	Kent
Düsey konumsal kapsam	Yer altı ve yer üstü	Yer altı ve yer üstü	Yer altı ve yer üstü	Yer altı ve yer üstü	Yer altı
Altyapı tesisleri	Elektrik, petrol, gaz, kimyasal, su, atık su, termal, elektronik haberleşme	Katı, sıvı, gaz, elektrik, optik	Su, su toplama, atık su	Isıtma ve soğutma havalandırma, sıhhi tesisat, elektrik, elektronik haberleşme	-
Farklı veri setleriyle entegrasyon	-	Evet, (CityGML formatında 3 boyutlu kent modelleri)	Evet, diğer mühendislik yapıları ile projeleri	Evet, yapı elemanları ve projeleri	Evet, yeraltı ortamı

3.2 Coğrafi Temsil (Geometri)

UNADE, MUDDI ve INSPIRE UN modellerinde teknik altyapı ağları, düğüm-kenar-düğüm (node-arc-node) olarak ifade edilen çizge (graph) yapısı ile temsil edilmektedir. Bu yapıda düğümler nokta; kenarlar ise çizgi olarak temsil edilir; bir ağ en az iki düğüm ile bir kenardan oluşur. Çizgi/kenar özelliği gösteren nesnelere, kablo, boru gibi doğrusal nesnelere, nokta özelliği gösteren nesnelere; pompa, sayaç, vana vb. ağ elemanları olabileceği gibi hatların birleşim noktaları, uç noktaları gibi karakteristik noktaları olabilir. Topolojik yapı, birbirlerine fiziksel olarak bağlı teknik altyapı tesisleri arasındaki ilişkiyi modelleyerek, örneğin, teknik altyapı tesislerinin hasar görmesi veya devre dışı kalması durumunda diğer tesislere olan etkilerinin belirlenmesi vb. gibi konumsal analizlerinin yapılmasına olanak verir. MUDDI ile UNADE, INSPIRE-UN modelinden farklı olarak, farklı ağlar arasındaki ilişkileri temsil etmeye olanak vermektedir. IFC modelinde, nesnelere arasındaki ilişkiler, *IfcRelConnects* sınıfının alt tipleri (örneğin, *IfcRelConnectsPorts*, *IfcRelConnectsPortToElement*, *IfcRelFlowControlElements*) ile tanımlanır. Bu ilişkiler, aynı ağa ya da farklı ağlara ait tesisler arasında kurulabilir.

CityGML nesnelere farklı anlamsal ve geometrik temsil edilmiş biçimlerini tanımlayan detay düzeyi (level of detail, LoD) kavramını kullanmaktadır. UNADE modeli de CityGML modelinden türetilmiş için bu özelliğe sahiptir ve tesislerin temsili için birden fazla geometri yapısı kullanılabilir. Bununla beraber, anlamsal bakımdan bir detay düzeyi tanımı yapılmamıştır. Farklı kullanım durumlarında geometrik, topografik ve işlevsel bakımdan gereksinim duyulan detay düzeyi tanımlamalarının yapılması planlanmaktadır (Kutzner, Hijazi, & Kolbe, 2018, s. 30). IFC, tesislerin farklı geometrik yapılarda temsiline olanak vermekte ve kullanıcılar kendi detay düzeyi tanımını yapabilmektedir. IFC’de yer alan LoD (level of development) kavramı, bir projede söz konusu modelin temsil ettiği gelişme düzeyini ifade eder ve bu tanımlama geometrik anlamda bir detay düzeyi değildir. MUDDI, kullanım durumlarının gerektirdiği detay düzeyinde veriyi temsil edebilme hedefi doğrultusunda, modüler ve esnek bir yapıda tasarlanmıştır. INSPIRE-UN ve LandInfra/InfraGML’de detay düzeyine ait tanımlamalar yer almamaktadır.

Teknik altyapı tesislerinin 3 boyutlu geometrilerinin temsili için UNADE ve LandInfra/InfraGML sınır temsili (boundary representation, BRep) tekniğini kullanmaktadır. IFC, sınır temsiline ek olarak yapısal katı geometri (constructive solid geometry, CSG) gibi parametrik modelleri de desteklemektedir. MUDDI öz modeli 3 boyutlu nesnelere temsili

desteklemez ancak *I3D* ve *IVoxel* arayüzleriyle, katı cisim geometrileri ve voxel koleksiyonlarıyla ifade edilen 3 boyutlu nesnelerin öz model ile birlikte kullanımına olanak verir. Bununla beraber, güncelleştirilmekte olan versiyonu tesislerin uzunluk, derinlik, yükseklik, genişlik vb. ölçülerini içerir ve böylelikle 3 boyutlu görselleştirme için gerekli parametreleri sağlar. 2 boyutlu bir ağ modelinden türetilen INSPIRE-UN, tesislerin derinlik/yükseklik bilgisini içermez ve 3 boyutlu temsiline olanak vermez.

Tablo 2: Modellerin içerik ve kapsam açılarından karşılaştırılması

	INSPIRE-UN	CityGML UNADE	InfraGML	IFC	MUDDI
2 boyutlu ağ topolojisi	+	+	-	+	+
Farklı türdeki ağlar arasındaki ilişkiler/bağlılık	-	+	-	+	+
3 Boyutlu Temsil	-	+	+	+	+
Farklı detay düzeyleri	-	+	-	+	+

4. Sonuç ve Öneriler

Teknik altyapı tesislerine ait coğrafi veriler genellikle altyapı sahibi işletmeciler tarafından yönetilmektedir. Ancak bir altyapı tesisinin projelendirilmesi, inşası, bakımı ile kent idaresi, afet yönetimi gibi süreçlerde diğer tüm teknik altyapı tesislerine ait coğrafi verilere gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmada, bu verilerin paylaşımı/değişimi için geliştirilmiş, literatürde kabul görmüş ve standart olarak yayımlanmış veri modelleri incelenmiştir. Bu araştırma sonunda, tüm uygulamalar için kullanılabilir, uluslararası düzeyde standart olarak kabul edilmiş genel bir coğrafi veri modeli bulunmadığı anlaşılmıştır. INSPIRE-UN, UNADE, IFC ve InfraGML modellerinin, odaklandıkları farklı kullanım durumları ile uygulamaların gereksinimleri doğrultusunda, farklı yeteneklere, geometrik ve anlamsal içeriklere sahip oldukları görülmektedir. Örneğin, INSPIRE-UN, teknik altyapı kazı çalışmalarının koordinasyonunda coğrafi veri değişimi uygulamalarına; UNADE ise kapsamlı ağ temsili ve 3 boyutlu kent modelleriyle entegrasyon sağlaması nedeniyle, şebeke analizlerini ve simülasyonları içeren uygulamalara temel oluşturmuştur. Halen geliştirilmekte olan MUDDI, teknik altyapı verisi gerektiren tüm uygulamalar için bütüncül bir yaklaşım sunmakta ve bir veri setinin birden fazla uygulamada kullanımını etkinleştirmeyi hedeflemektedir.

Kentlerde yer altını yoğun biçimde kullanan teknik altyapı tesislerine ilişkin uygulamalar, çoğunlukla tesislere ait 3 boyutlu coğrafi veri temsili gerektirir. Bu doğrultuda iki boyutlu ağ modelini temel alan INSPIRE-UN haricindeki diğer coğrafi veri modellerinin bu işlevselliği sağlayacak biçimde tasarlandığı görülmektedir. Bununla beraber, Hollanda ve Fransa'da teknik altyapı kazı çalışmalarında güvenliğin sağlanmasına yönelik ulusal mevzuatı destekleyen IMKL ve Star-DT standart coğrafi veri modelleri, INSPIRE-UN modelinin 3 boyutlu temsile olanak verecek biçimde geliştirilebileceğini göstermiştir. Ülkemizde, teknik altyapı tesislerine yönelik standart bir veri modeli sunan TUCBS Altyapı Ağları uygulama şemasının etkinliği, Hollanda ve Fransa'daki deneyimlerden yararlanarak geliştirilebilir; böylelikle altyapı tesislerinin onarımı veya deplase edilmesi veya yeni tesislerin yapım sürecindeki planlama, projelendirme ve inşaat faaliyetlerinin koordinasyonu sağlanabilir.

Yazar Katkısı

Azer İlgar: Fikir, Tasarım, Literatür taraması, Analiz ve yorumlama, Yazım. **Volkan Çağdaş:** Fikir, Denetleme, Makale değerlendirme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Al-Hader, M., Rodzi, A., Sharif, A. R., & Ahmad, N. (2009). SOA of smart city geospatial management. *Proceedings of the 2009 Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 6-10.
- ASCE (2018). *Standard Guideline for Recording and Exchanging Utility Infrastructure Data White Paper*. https://www.asce.org/uploadedFiles/Technical_Areas/Construction_Engineering/Content_Pieces/as-built-standards-whitepaper.pdf (Erişim Tarihi: 20.05.2021).
- Beck, A. R., Fu, G., Cohn, A. G., Bennett, B., & Stell, J. G. (2008). A framework for utility data integration in the UK. *Urban and Regional Data Management*, 261-276.
- Becker, T., Nagel, C., & Kolbe, T. H. (2011). *Integrated 3D modeling of multi-utility networks and their interdependencies for critical infrastructure analysis*. T. Kolbe, G. König, & C. Nagel (ed), *Advances in 3D geo-information sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Becker, T., Bartels, M., Hahne, M., Hempel, L., & Lieb, R. (2012). Cascading effects and interorganisational crisis management of critical infrastructure operators. Findings of a research project. *on Geo-information for Disaster Management–Best Practices*, 105.
- Becker, T., Nagel, C., & Kolbe, T. H. (2013). *Semantic 3D modeling of multi-utility networks in cities for analysis and 3D visualization*. Pouliot, J., Daniel, S., Hubert, F., & Zamyadi, A. (ed) *Progress and New Trends in 3D Geoinformation Sciences*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Biljecki, F., Kumar, K., & Nagel, C. (2018). CityGML application domain extension (ADE): overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 1-17.
- Boates, I., Agugiaro, G., & Nichersu, A. (2018). Network modelling and semantic 3d city models: testing the maturity of the utility network ADE for CITYGML with a water network test case. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4(4).
- buildingSMART (2018a), Introduction, https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/link/introduction.htm (Erişim Tarihi: 10.05.2021)
- buildingSMART (2018b), Resource definition data schemas, https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/schema/chapter-8.htm (Erişim Tarihi: 10.05.2021)
- buildingSMART (2018c), Core data schemas, https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/schema/chapter-5.htm (Erişim Tarihi: 10.05.2021)
- buildingSMART (2018d), Shared element data schemas, https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/ADD2_TC1/HTML/schema/chapter-5.htm (Erişim Tarihi: 10.05.2021)
- CBSGM (2020). Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi Altyapı Teması Veri Tanımlama Dokümanı. https://tucbs-public-api.csb.gov.tr/tucbs/tucbs_tanimlama_dokumanlari/TUCBS_AY.pdf (Erişim Tarihi: 21.05.2021)
- Cheng, J. C., & Deng, Y. (2015). An integrated BIM-GIS framework for utility information management and analyses. *Computing in Civil Engineering 2015*, 667-674.
- den Duijn, X., Agugiaro, G., & Zlatanova, S. (2018). Modelling below-and above-ground utility network features with the CityGML Utility Network ADE: Experiences from Rotterdam. *Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Data and Smart Cities, Delft, The Netherlands*, 43-50.
- Fossatti, F., Agugiaro, G., olde Scholtenhuis, L., & Dorée, A. (2020). Data modeling for operation and maintenance of utility networks:

- Implementation and testing. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 6(4/W1), 69-76.
- Gale, W., & Hammerschmidt, A. (2015). *Innovation in Technologies to Support the Storage, Retrieval, and Use of 3-D Utility Location Data in Highway Renewal*: Transportation Research Board of the National Academies.
- Geonovum. (2015). IMKL2015 - Dataspecificatie Utiliteitsnetten https://register.geostandaarden.nl/informatiemodel/imkl2015/1.0.0RC1/IMKL2015_Dataspecificatie_1.0RC1.pdf (Erişim Tarihi: 20.05.2021)
- Gilbert, T., Barr, S., James, P., Morley, J., & Ji, Q. (2018). Software systems approach to multi-scale GIS-BIM utility infrastructure network integration and resource flow simulation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8), 310.
- Hijazi, I., Ehlers, M., Zlatanova, S., & Isikdag, U. (2009). IFC to CityGML transformation framework for geo-analysis: a water utility network case. *4th International Workshop on 3D Geo-Information*.
- Hijazi, I., Ehlers, M., Zlatanova, S., Becker, T., & Berlo, L. v. (2011). *Initial investigations for modeling interior Utilities within 3D Geo Context: Transforming IFC- interior utility to CityGML/UtilityNetworkADE*. T. H. Kolbe, G. König, & C. Nagel (ed) *Advances in 3D Geo-Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hijazi, I. H., Ehlers, M., & Zlatanova, S. (2012). NIBU: A new approach to representing and analysing interior utility networks within 3D geo-information systems. *International Journal of Digital Earth*, 5(1), 22-42.
- INSPIRE (2013). *D2.8.III.6 Data Specification on Utility and Government Services Technical Guidelines*.
- Islam, T., & Moselhi, O. (2012). Modeling geospatial interdependence for integrated municipal infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 18(2), 68-74.
- Jung, Y. J. (2012). Evaluation of subsurface utility engineering for highway projects: Benefit–cost analysis. *Tunnelling and underground space technology*, 27(1), 111-122.
- Kolbe, T. H. (2009). *Representing and exchanging 3D city models with CityGML*. T. H. Kolbe, G. König, & C. Nagel (ed) *Advances in 3D Geo-Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kutzner, T., & Kolbe, T. H. (2016). Extending semantic 3D city models by supply and disposal networks for analysing the urban supply situation. *Lösungen für eine Welt im Wandel, Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG, 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*, pp. 382-394.
- Kutzner, T., Hijazi, I., & Kolbe, T. H. (2018). Semantic modelling of 3D multi-utility networks for urban analyses and simulations: The CityGML utility network ADE. *International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)*, 7(2), 1-34.
- Kutzner, T., Chaturvedi, K., & Kolbe, T. H. (2020). CityGML 3.0: New functions open up new applications. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 43-61.
- Lee, P. C., Wang, Y., Lo, T. P., & Long, D. (2018). An integrated system framework of building information modelling and geographical information system for utility tunnel maintenance management. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 79, 263-273.
- Lieberman, J., & Ryan, A. (2017). *OGC Underground Infrastructure Concept Study Engineering Report: Open Geospatial Consortium*.
- Lieberman, J. (2019). *Model for Underground Data Definition and Integration (MUDDI) Engineering Report: Open Geospatial Consortium*.
- Lieberman, J., & Roensdorf, C. (2020). Modular Approach to 3D Representation of Underground Infrastructure in the Model for Underground Data Definition and Integration (MUDDI). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44, 75-81.
- Marzouk, M., & Othman, A. (2020). Planning utility infrastructure requirements for smart cities using the integration between BIM and GIS. *Sustainable Cities and Society*, 57, 102120.
- OGC (2016). P. Scarponcini (ed) OGC Land and Infrastructure Conceptual Model Standard (LandInfra).
- OGC (2017a). P. Scarponcini (ed) OGC InfraGML 1.0: Part 0 – LandInfra Core - Encoding Standard. P.
- OGC (2017b). P. Scarponcini (ed) OGC InfraGML 1.0: Part 2 – LandInfra Facilities and Projects – Encoding Standard. P.
- olde Scholtenhuis, L. L., Hartmann, T., & Dorée, A. G. (2016). 4D CAD based method for supporting coordination of urban subsurface utility projects. *Automation in construction*, 62, 66-77.
- olde Scholtenhuis, L. L., den Duijn, X., & Zlatanova, S. (2018). Representing geographical uncertainties of utility location data in 3D. *Automation in construction*, 96, 483-493.
- Ribberink, O. (2017). *Standardization of geo data exchange between network operators and contractors in underground utilities* (Yüksek Lisans Tezi). Geographical Information Management and Applications (GIMA), Hollanda.

- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE control systems magazine*, 21(6), 11-25.
- Sterling, R. L., Anspach, J. H., Allouche, E. N., Simicevic, J., Rogers, C. D., Weston, K. E., & Hayes, K. (2009). *Encouraging innovation in locating and characterizing underground utilities* (No. SHRP 2 Report S2-R01-RW).
- Talmaki, S., Kamat, V. R., & Cai, H. (2013). Geometric modeling of geospatial data for visualization-assisted excavation. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 283-298.
- van den Brink, L., Stoter, J., & Zlatanova, S. (2013). UML-based approach to developing a CityGML application domain extension. *Transactions in GIS*, 17(6), 920-942.
- van den Brink, L., Janssen, P., & Quak, W. (2017). IMKL2015 - Dataspecificatie Utiliteitsnetten. Geonovum. https://register.geostandaard.nl/informatiemodel/imkl2015/1.2.1/IMKL2015_Dataspecificatie_1.2.1.pdf (Erişim Tarihi: 15.01.2021)
- Vishnu, E., & Saran, S. (2018). SEMANTIC MODELING OF UTILITY NETWORKS IMPLEMENTATION OF USE CASES FOR DEHRADUN CITY. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII-5, 139-145.
- Wang, M., Deng, Y., Won, J., & Cheng, J. C. (2019). An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS. *Automation in Construction*, 107, 102931.
- Yang, Y., Ng, S. T., Xu, F. J., & Skitmore, M. (2018). Towards sustainable and resilient high density cities through better integration of infrastructure networks. *Sustainable Cities and Society*, 42, 407-422.
- Yao, Z., Nagel, C., Kunde, F., Hudra, G., Willkomm, P., Donaubaer, A., Adolphi, T., & Kolbe, T. H. (2018). 3DCityDB-a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1), 1-26.
- Zhao, L., Liu, Z., & Mbachu, J. (2019). An integrated BIM-GIS method for planning of water distribution system. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(8), 331.

Sentinel-2 görüntüleri ve ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verilerinin kombinasyonu ile batimetri haritası üretilebilirliğinin araştırılması

Mehmet Güven Koçak¹ 

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Çiğli, İzmir, Türkiye.

Öz: Batimetri haritaları akustik ve lazer gibi aktif algılayıcı sistemlerle yüksek doğruluklarla üretilebilmektedir. Yanal taramalı sonar, tek ve çok ışınlı iskandil gibi çeşitli akustik sistemlerin sığ sulara işletilmesi zor olup lazer sistemlerle ölçme yapılabilmesi de uygun optik geçirgenliğin varlığına bağlıdır. İki sistemin uygulanmasında iş yükü, zamansal ve ekonomik maliyet dezavantajlarından da bahsedilmelidir. Öte yandan geniş bir sahayı kapsayan ve erişilmesi güç konumlara ait multispektral görüntülerle 15 m derinliğe kadar sığ sulara batimetri haritası uygun maliyetle elde edilebilmektedir. Deneysel yaklaşım olarak bilinen bu yöntem uygulama yapılan sahadan toplanmış yeterli sayıda derinlik verisine ihtiyaç duyar. Bu çalışmada sahaya gitmeksizin, ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verilerinden elde edilen dışsal derinlik ölçmeleri ile Sentinel-2 multispektral görüntüleri kombine edilerek bir çalışma alanının batimetri haritasının üretilmesi ve bu haritanın doğruluğunun test edilmesi amaçlanmıştır. Sentinel-2'nin kıyı aerosol, mavi ve yeşil bantlarında ölçülen yansıma değerleri log-doğrusal ve log-oransal yaklaşımlar için ayrı ayrı olmak üzere çoklu doğrusal regresyonla modellenmiş ve bağıl derinlik haritası elde edilmiştir. Metrik olmayan bu harita eğitime verisi olarak seçilen, kırılma düzeltmesi getirilmiş ICESat-2 derinlik değerleri kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Bu eğitime verisinden elde edilen çoklu doğrusal regresyon modeliyle batimetri haritası hesaplanmış, test alanının daha önce yanar taramalı sonar ile üretilmiş 60 m grid aralıklı batimetri haritasıyla karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen karşılaştırma testlerinde atmosferik düzeltme getirilmesinin sonuçları iyileştirmede gözlenmiş, log-doğrusal yaklaşımla log-oransal yaklaşıma nazaran daha iyi doğruluk değerlerine ulaşılmıştır. Akustik olarak üretilen batimetri haritasından hesaplanan farklarla ± 1.6 m karesel ortalama hata değeri bulunmuş ve mutlak değerleri 5 m ve altında olan farkların sayısının toplam karşılaştırma noktalarının %94'ünü oluşturduğu gözlenmiştir. Sentinel-2 ve ICESat-2 sinerjisiyle elde edilen batimetri haritası navigasyon için beklenen doğruluğu karşılamamaktadır. Ancak sahaya gitmeksizin, iki veri kümesi birleştirilerek optik geçirgenliğin haritalamaya izin verdiği sığ suların batimetri haritaları araştırma ve diğer uygulama çalışmaları için uygun maliyetle üretilebilir.

Anahtar Sözcükler: Batimetri, Sayısal yükseklik modeli, Sentinel-2, ICESat-2, Karesel ortalama hata, Çoklu doğrusal regresyon

Investigation on the generation of bathymetric maps by combining Sentinel-2 imagery and ICESat-2 ATL03 photon height data

Abstract: Bathymetry maps can be produced with high accuracy by using active acoustic and laser sensing systems. Various acoustic systems such as side-scan sonar, single and multi-beam echosounder are difficult to operate in shallow waters, and measurement with laser systems depends on the presence of appropriate optical transparency. Disadvantages such as workload, time, and economic costs should also be mentioned in the implementation of the two systems. On the other hand, bathymetry maps can be obtained in shallow waters up to a depth of 15 m at an affordable cost with multispectral images covering larger areas and remote/inaccessible locations. This method, known as the experimental approach, requires however sufficient field depth data. In this study, bathymetric map of a study area was generated by combining external depth measurements obtained from ICESat-2 ATL03 photon heights and Sentinel-2 multispectral images. This study aimed to test the accuracy of this bathymetric map against an existing map. Reflectance values measured in Sentinel-2's coastal aerosol, blue and green bands were modelled under multiple linear regression by using both log-linear and log-rational approaches, and as a result a relative depth map was obtained. The resultant non-metric map is scaled by refraction corrected ICESat-2 depth values building the model's training set. The bathymetry map was calculated with the multiple linear regression model obtained from this training set and compared with the existing side-scan sonar bathymetric map of the test area. The comparison tests revealed that the atmospheric correction did not improve the results, and better accuracy values were achieved with the log-linear approach compared to the log-rational approach. A root mean square error of ± 1.6 m was calculated from the comparisons to the acoustic bathymetry map. The number of differences having absolute values of 5 m and below constituted 94% of the total comparison points. Although the expected accuracy for navigation is not met, bathymetric maps of shallow areas with high optical transparency can still be obtained at a low cost by combining two independent satellite-based datasets for research and other applications.

Keywords: Bathymetry, Digital elevation model, Sentinel-2, ICESat-2, Root mean square error, Multiple linear regression

1. Giriş

Karada etkisi; sıcaklıkların artması, yağışların düzensiz ve uç değerlere ulaşması, buzulların erimesi şeklinde görülen iklim değişikliği deniz faunasını ve florasını da etkilemektedir. Deniz çayır yoğunluğunun azalması, mercan resiflerinin beyazlaması, deniz seviyesinin yükselmesi bu değişimlere örnek olarak verilebilir (Pörtner, Roberts, Masson-Delmotte, & Zhai, 2019). Deniz ekosisteminde ortaya çıkan bozulmaların azaltılması ve önlenmesi hatta uzun vadede ortadan kaldırılması ile bu ekosistemin sürdürülebilirliğinin sağlanması için uluslararası ilkeler benimsenerek harekete geçilmeye başlanmıştır. Uluslararası toplum tarafından üzerinde anlaşmaya varılan sürdürülebilir kalkınma hedeflerinden 14'üncüsü deniz yaşam alanına odaklanmaktadır (United Nations, 2015). Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen Starfish 2030 misyonu kapsamında belirlenen beş ana hedeften ilki olan "bilgi ve duygu boşluğu" altındaki alt hedeflerinden bir tanesi Avrupa deniz tabanının 2030 yılına kadar tamamının yüksek çözünürlükte haritalanmasıdır (Lamy vd., 2020). Deniz taban topoğrafyasının gerekliliğine dair dramatik bir deneyim Malezya Havayolları'na ait MH370 numaralı uçağın Kuala Lumpur'dan Pekin'e gitmekteyken 8 Mart 2014 tarihindeki uçuşu sırasında radardan kaybolarak Hint Okyanusu'na düşmesiyle yaşanmıştır. Yapılan arama kurtarma çalışmaları sırasında yaşananlar araştırmacılara Ay, Mars ve hatta Venüs yüzeyinin yeryüzünün deniz tabanından çok daha yüksek çözünürlüklerle haritalandırıldığını göstermiştir (Tozer vd., 2019, URL-1).

Deniz taban topoğrafyasının sahada ölçmelerle elde edilmesinde deniz taşıtına monte edilen yanal taramalı sonar, tek ve çok ışıklı iskandil gibi modern yöntemler kullanılmaktadır. Bu sistemler ışın kaynağı olarak ses dalgalarını kullanan aktif sistemlerdir. Deniz taşıtı ile yerinde ölçüm planlı bir lojistik gerektirmekte olup zahmetlidir. Öte yandan akustik sistemlerle haritalama deniz taşıtının girebileceği yeterince derin kesimlerde gerçekleştirilebilir. Su yüzeyi ile teması zorunlu olan akustik algılayıcılara alternatif bir diğer yöntem ise optik lazer düzeneklerle gerçekleştirilen ölçmeleri kullanır. Su kütlesi üzerinde belirli bir yükseklikte hareket eden hava aracının taşıdığı sistem ölçme kaynağı olarak yeşil ve yakın kızılötesi dalga boylu lazer ışınlarını kullanır. Hava Lidar olarak isimlendirilen sistemle yeşil dalga boylu lazerin deniz tabanından, kızılötesi olanının da deniz yüzeyinden yansımaları ölçülerek derinlik verisi üretilir. Lazer ile ölçmeler akustik yöntemin aksine su bulanıklığının, lazerin geçirgenliğine izin verdiği daha çok kıyıya yakın sığ kesimlerinde gerçekleştirilebilir (Chust, Grande, Galparsoro, Uriarte, & Borja, 2010). Her iki yöntemin ekonomik ve zamansal maliyeti yüksek olup yeryüzünün erişilmesi güç ve gerekli ölçme altyapısının bulunmadığı konular için uygulanmaları zordur (Gao, 2009; Kutser, Hedley, Giardino, Roelfsema & Brando, 2020).

Yukarıda bahsedilen iki yönteme nazaran veri toplama süreci zahmetsiz, uygun maliyetli ve geniş alanların haritalanmasına olanak veren bir başka yöntem pasif algılayıcılarla elde edilen uydu görüntülerinden yararlanmaktadır. Uydu tabanlı batimetri, algılayıcıların gelişimine bağlı olarak multispektral ve hiperspektral görüntüler ile görüntü çiftlerini veri kaynağı olarak kullanır. Hiperspektral görüntülerle batimetri tayininde derinlik yanında suyun özellikleri ile taban yansıma değerlerinin birlikte kestirildiği fiziksel yaklaşım kullanılır (Lee, Carder, Mobley, Steward, & Patch, 1998; Lee, Carder, Mobley, Steward, & Patch, 1999; Chen, Yang, Xu, & Huang, 2019). Uydu tabanlı hiperspektral sistemlerin mekânsal çözünürlükleri halihazırda 30 m civarında olup operasyonel bir karaktere henüz sahip değildirler (Vangi vd., 2021). Klasik fotogrametrik yöntemle sığ sularda batimetri belirlenebileceği yüksek çözünürlüklü WorldView-2 görüntü çifti örneğinde gösterilmiştir. Ancak fotogrametrik yöntemin başarısı görüntü eşleştirme için deniz tabanında uygun kontrast ile durgun su yüzeyinin varlığına bağlıdır (Hodúl, Bird, Knudby, & Chénier, 2018).

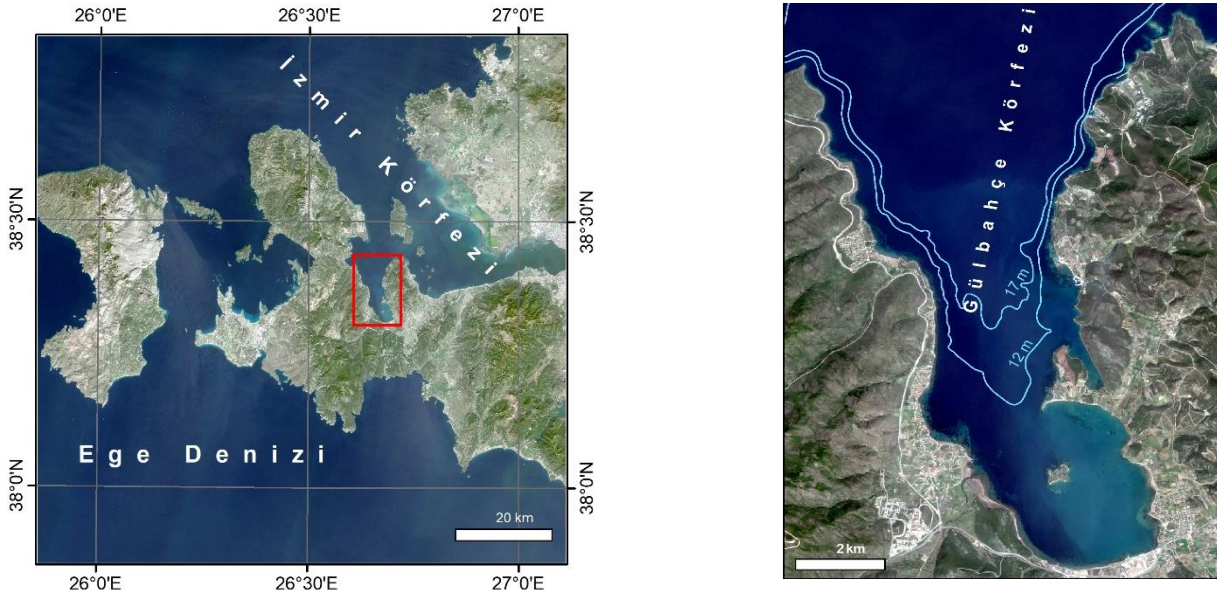
Hiperspektral ve fotogrametrik yönteme nazaran uygulanması daha pratik olan multispektral görüntülerle batimetri belirleme deneysel yöntem olarak da bilinir ve uygulaması derinliğin, yansıma değerlerinin fonksiyonu olarak modellenmesi prensibine dayanır. Fonksiyonel model olarak iki yaklaşım ile uygulamada sıklıkla karşılaşılmakta; ilki yansıma değerlerinin

logaritmalarını (Lyzenga, 1978; Lyzenga, Malinas, & Tanis, 2006; Philpot, 1989) ikincisi ise bunların farklı bantlar için oranlarını kullanmaktadır (Stumpf, Holderied, & Sinclair, 2003). Log-doğrusal ve log-oransal yöntem olarak da isimlendirilen her iki yaklaşım, modellenen bağımlı derinlik değişkeni için yeter sayıda saha örneklemesine ihtiyaç duyar. Bu da yöntemi yukarıda ele alınan diğer yöntem ve ölçme sistemlerine nazaran dezavantajlı hale getirmektedir. Ancak buzul kütlelerini takip etmek için tasarlanan ve 2018 Eylül ayında uzaya gönderilen ICESat-2 (The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2) uydusuna ait verilerin 2019 yılı Mayıs ayı itibariyle kullanıcıların erişimine açılmasıyla bu dışsal veri sahaya gitmeksizin de sağlanabilmektedir. 532 nm dalga boylu lazer kullanan uydu sistemi ICESat-2 ile kıyıya yakın bulanık olmayan sularda derinlik değerleri gözlemlenebilmektedir. ICESat-2 ile ölçülen derinlik değerleri hava ve su kırılma katsayıları göz önüne alınarak hız düzeltilmesi getirildikten sonra kullanılmalıdır (Parrish vd., 2019).

Sentinel-2 ve ICESat-2'nin birlikte kombinasyonu ile örnek olarak Güney Çin Denizi'ndeki Yongle mercan adaları ve Bahama'da (Ma vd., 2020), Bermuda, Girit ve Florida'daki üç test alanında (Thomas vd., 2021) batimetri haritaları üretilerek doğrulukları bağımsız verilerle test edilmiştir. İki sistemin entegrasyonu ile elde edilen batimetri haritalarının farklı coğrafi konumlarda, farklı özelliklere sahip alanlarda test edilmesi yöntemin operasyonel olarak uygulanıp uygulanamayacağını anlamaya imkân verecektir. Bu kapsamda bu çalışma, Sentinel-2+ICESat-2 kombinasyon yaklaşımının yanal taramalı sonar ile batimetri haritası mevcut ve tabanının belirli konumlarında Posidonia Oceanica deniz çayırları olan Gülbahçe Körfezi test alanında uygulanabilirliğini test etmeyi hedeflemektedir.

2. Veri ve Yöntem

Bu çalışma Sentinel-2 ve ICESat-2 uydu verilerini kombine ederek uydu tabanlı batimetri yöntemlerinden olan deneysel yaklaşımı kullanmış ve elde edilen batimetri haritasının testini gerçekleştirmiştir. Çalışma alanı olarak İzmir'in 45 km batısında, Karaburun Yarımadası'nın hemen sınırında yer alan Gülbahçe Körfezi alınmıştır. Körfez 58 km² alana sahip ve kuzeyde en derin yeri 30 m civarındadır, tabanı da deniz habitatu için önemli deniz çayırlarını barındırmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: 100 km x 100 km ebatlı 4.3.2017 tarihli Sentinel-2A L2A görüntüsü (solda). Kırmızı ile gösterilen çerçeve çalışma alanı Gülbahçe Körfezi'ni göstermektedir (sağda)

2.1 Sentinel-2 Uydu Görüntüsü

Sentinel-2 Avrupa Komisyonu'nun Copernicus programı kapsamında işletilen, multispektral görüntüleme (Multispectral Imaging, MSI) kapasitesine sahip bir uydu sistemidir. Sistem 23 Haziran 2015 ve 7 Mart 2017 tarihlerinde fırlatılan 2A ve 2B ikiz uydulardan oluşmakta ve her bir uydu yeryüzünün bir kesimini 10 gün aralıkla görüntüleyebilmektedir. Aynı

yörüngede birbirlerinden 180° faz açılı olarak dizilen 2A ve 2B ile görüntülemenin tekrarlama periyodu 5 güne inmektedir. İkiz uydular yerden 786 km yüksekte, kutupsal ve güneş eş zamanlı bir yörüngede hareket ederken yeryüzünü 290 km şerit genişliğinde tarayabilmektedirler. Uydulardaki MSI elektromanyetik spektrumun görünür, kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi bölgelerinde olmak üzere toplam 13 bantta görüntüleme yapabilmektedir. Bunlardan dördü 10 m, altısı 20 m ve geriye kalan üç adedi de 60 m yer örnekleme aralığına sahiptir (ESA, 2015).

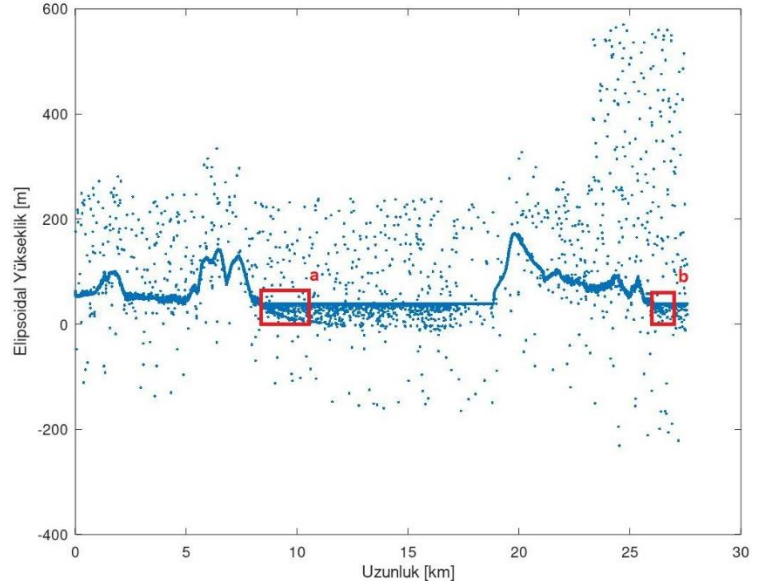
Sentinel-2 görüntülerinin kullanıcılara erişimi Copernicus veri sunucusu (URL-2) üzerinden sağlanmaktadır. Veriler 100 km x 100 km'lik bloklar halinde ve UTM / WGS84 projeksiyon/datumunda verilmektedir. Sunucuda mevcut 2017-2020 yıllarını kapsayan dört yıllık veri bulutluluk, pus, güneş yansıması gibi bozucu etkilerin az olması ve körfezin kıyıya yakın kısımlarında deniz tabanının net olarak seçilebilmesi kriterleri göz önünde bulundurularak görsel olarak taranmış ve en uygun görüntü belirlenmiştir. Bu görüntü, çalışma alanı üzerinden saat 08:59'da (UTC) geçen 4 Mart 2017 tarihli seviye 1C (L1C) görüntüsüdür. Sentinel-2 L1C görüntüleri atmosfer tavanından yansıma değerlerini (Top Of Atmosphere, TOA) veren ürünlerdir. Çalışmada batimetrinin belirlenmesi için deniz tabanından en yüksek enerjili yansımayı veren ilk üç bantın kullanılması öngörülmüştür. Bu bantlar kıyı aerosol (443 nm), mavi (490 nm) ve yeşil (560 nm) bantlarıdır ve yer örnekleme aralıkları sırasıyla 60, 10 ve 10 m şeklindedir. ESA'nın SNAP 6.0 yazılımı kullanılarak kıyı aerosol bant görüntüsü 10 m yer örnekleme aralığına sahip olacak şekilde yeniden örneklenmiştir. Çalışma kapsamında karşılaştırma yapmak üzere L1C görüntüsüne SNAP yazılımı içerisinde mevcut Sen2Cor v2.5.5 eklentisi kullanılarak atmosferik düzeltme de uygulanmıştır. Atmosferik düzeltme getirilerek oluşturulan yeni görüntü seviye 2A (L2A) görüntüsü olarak isimlendirilir ve atmosfer tabanından yani su yüzeyinden yansıma değerlerini vermektedir. L1C görüntüsünde güneş parıldaama etkisi olup olmadığı test edilerek bu etkinin olmadığı da tespit edilmiştir (Kay, Hedley, & Lavender, 2009).

2.2 ICESat-2 Foton Yükseklik Verisi

ICESat-2 uydusu NASA tarafından 15 Eylül 2018 tarihinde buzul kütlelerin yüksekliklerinin değişimi ile bitki örtüsü yüksekliğinin belirlenmesi amaçlarıyla uzaya gönderilmiştir. Yerden 500 km yüksekte ve kutupsal bir yörüngede hareket eden ICESat-2 uydusu Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS) Lidar ölçme sistemini taşımaktadır. ATLAS üretmiş olduğu 532 nm dalga boylu üç lazer ışın çiftiyle yeryüzüne 10 kHz frekansla foton kümesi gönderir ve bu şekilde uçuş doğrultusunda ~70 cm'lik bir örnekleme aralığında tarama elde edilir. Ortadaki referans izinden sol ve sağdaki izlere dik mesafe 3.3 km'dir. Her üç ana iz birbirinden uçuş doğrultusuna dik yönde 90 m uzaklıklı biri zayıf diğeri güçlü enerjiye sahip ışınlarla taranır (Neumann vd. 2019; Ağca, 2020). Yeryüzüne gönderilen ve atmosferde iki kez seyahat ederek uyduya dönebilen fotonlar 80 cm çapındaki teleskop ile algılanarak çarptığı yer yüzeyi ile arasındaki mesafe ölçülmüş olur. Uydunun fırlatılmasından sekiz ay sonra Mayıs 2019 tarihinde ICESat-2 verileri ücretsiz olarak kullanıma açılmıştır.

Sentinel-2 uydusu görüntüsü yansıma değerleriyle elde edilen bağıl batimetri haritasını ölçeklemek üzere bu çalışmada ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verilerinden yararlanılmış, ilgili verilere OpenAltimetry platformu üzerinden ulaşılmıştır (Khalsa vd., 2020; Neumann vd., 2021). Çalışma alanı üzerinden geçen 312, 754 ve 1280 numaralı yörüngeler detaylı olarak incelenerek deniz tabanından yansıma elde edilebilen veri setleri tespit edilmiştir. Deniz tabanından yansıma suyun bulanıklığına ve izin konumuna bağlı olarak değişmektedir (Parrish vd., 2019). Yapılan öncül hesaplamalar yalnızca 1280 numaralı yörüngeden alınan 21 Haziran 2019 tarihli yükseklik verilerinin incelenen diğer profillere nazaran daha yüksek doğruluklar ürettiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle uydunun ilgili tarihte saat 01:46'daki (UTC) geçişinde yüksek enerjili gt11 isimli ışın ile elde edilen profil değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 2). ATL03 yükseklikleri elipsoidal yükseklikler olarak verilmekte ve bu yüksekliklere katı yer gel-git, okyanus yüklemesi gibi çeşitli jeofizik düzeltmeler getirilmektedir (Neumann vd., 2021). Sentinel-2 ve ICESat-2 verilerinin alındığı tarihler arasında ICESat-2'ye ait uygun profil seçme zorunluluğu nedeniyle yaklaşık 27 aylık bir zaman farkı oluşmuş, bu süre içinde deniz tabanında herhangi bir değişim olmadığı

varsayılmıştır.



Şekil 2: (Sol) 21 Haziran 2019 tarihinde 01:46'da (UTC) çalışma alanı üzerinden geçen 1280 numaralı yükselen uydu yörüngesinden yapılan taramaların yer izleri. (Sağ) Analizde kullanılan gt1 izine ait yükseklik profili görülmektedir.

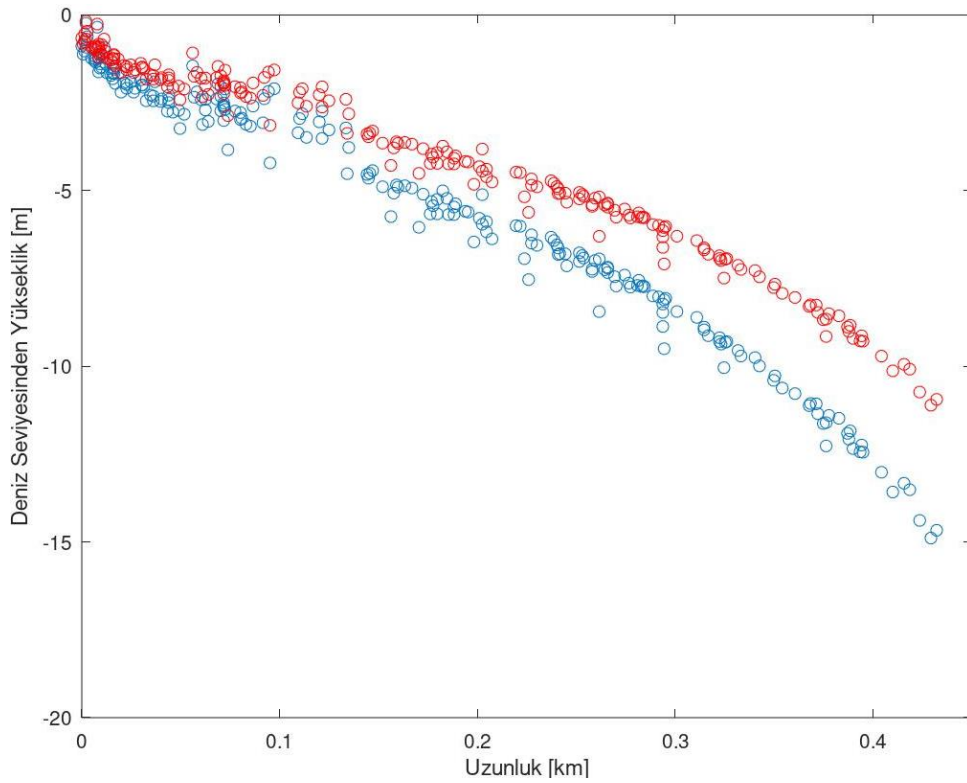
Şekil 2'de (Sağ) a ve b ile gösterilen, kıyıya yakın konumlarda deniz tabanından foton dönüşü olduğundan derinlik verisine ulaşılması mümkün olmuştur. Ancak elde edilen ham derinlik değerleri, deniz suyunun kırılma indisinin havanın kırılma indisinden büyük olması nedeniyle gerçek derinlik değerlerinden daha büyük olarak elde edilmektedir. Snell yasası kırılma indisi (n) ve ortamda ışığın yayılma hızı (v) değerleriyle

$$\frac{n_{hava}}{n_{su}} = \frac{v_{su}}{v_{hava}} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada kuru havanın ve deniz suyunun kırılma indisleri 532 nm dalga boylu ışık için sırasıyla ~1.0003 ve 1.34150 alınarak (Mobley, 2010) hesaplama yapılırsa ışığın su ve havadaki yayılım hızları arasındaki bağıntıdan ölçülen ve gerçek derinlikler arasındaki ilişki

$$h_{gerçek} \approx 0.7457 h_{ICESat-2} \quad (2)$$

şeklinde çıkarılabilir. Buna göre gerçek derinlik değeri, ICESat-2 ile ölçülen derinlik değerinin yaklaşık olarak %75'ine karşılık gelmektedir. Şekil 2'de (Sağ) b ile çerçevelenen konumdaki ICESat-2 profili ile (2) eşitliği ile hesaplanan profil Şekil 3'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3: Şekil 2'de b ile gösterilen konumdaki gürültüden arındırılmış ICESat-2 profili, Şekil kırılma indisi düzeltmesi getirilmemiş (mavi) ve getirilmiş (kırmızı) deniz seviyesinden yükseklik değerlerini göstermektedir.

2.3 Çoklu Doğrusal Regresyon Modeli

ICESat-2'nin körfez üzerinden geçişi sırasında deniz tabanından elde edilen derinliklerin aynı konumlardaki Sentinel-2 yansımaya değerleriyle modellenmesinde iki farklı yaklaşım uygulanmıştır. Her iki yaklaşım da çoklu doğrusal regresyon parametrik modelini kullanır ve model fonksiyonu her bir bant için su yüzeyinde ölçülen yansımaya değerinin deniz tabanına doğru derinliğin üstel bir fonksiyonu olacak şekilde azaldığı varsayılarak oluşturulur. İlk yöntemde model katsayıları yansımaya değerlerinin logaritması ile

$$z = \alpha_0 + \sum_{i=1}^M \alpha_i \log(r_i - r_i^{\infty}) , \quad M = \text{Bant sayısı} \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir (Lyenga, Malinas & Tanis, 2006). Log-doğrusal yaklaşımda model katsayılarının hesabında bir banttaki yansımaya değerinden aynı bantın su kütlelerinin sonsuz derin bir konumundaki yansımaya değerinin çıkarıldığına dikkat edilmelidir. Pratikte sonsuz derin bir konum yerine görüntü üzerinde en derin konumdaki ilgili banttaki ortalama yansımaya değeri kullanılabilir. α değerleri kestirilecek $M+1$ sayıda model parametrelerini göstermektedir.

İkinci yöntem (3) eşitliğinde verilen yansımaya değerlerinin logaritmaları yerine bu değerlerin oranlarını katsayı olarak hesaplar:

$$z = \beta_0 + \sum_{k=1}^N \beta_k \frac{\log(r_i - r_i^{\infty})}{\log(r_j - r_j^{\infty})} \quad \begin{array}{l} i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, M \\ N = \text{Kombinasyon sayısı} \end{array} \quad (4)$$

Eşitlikte geçen β_k değerleri parametre tahmini ile bulunacak $N+1$ sayıda parametreyi ifade etmektedir. Burada kombinasyon sayısı ile bant sayısı arasında $N = M \times (M - 1)$ ilişkisi vardır.

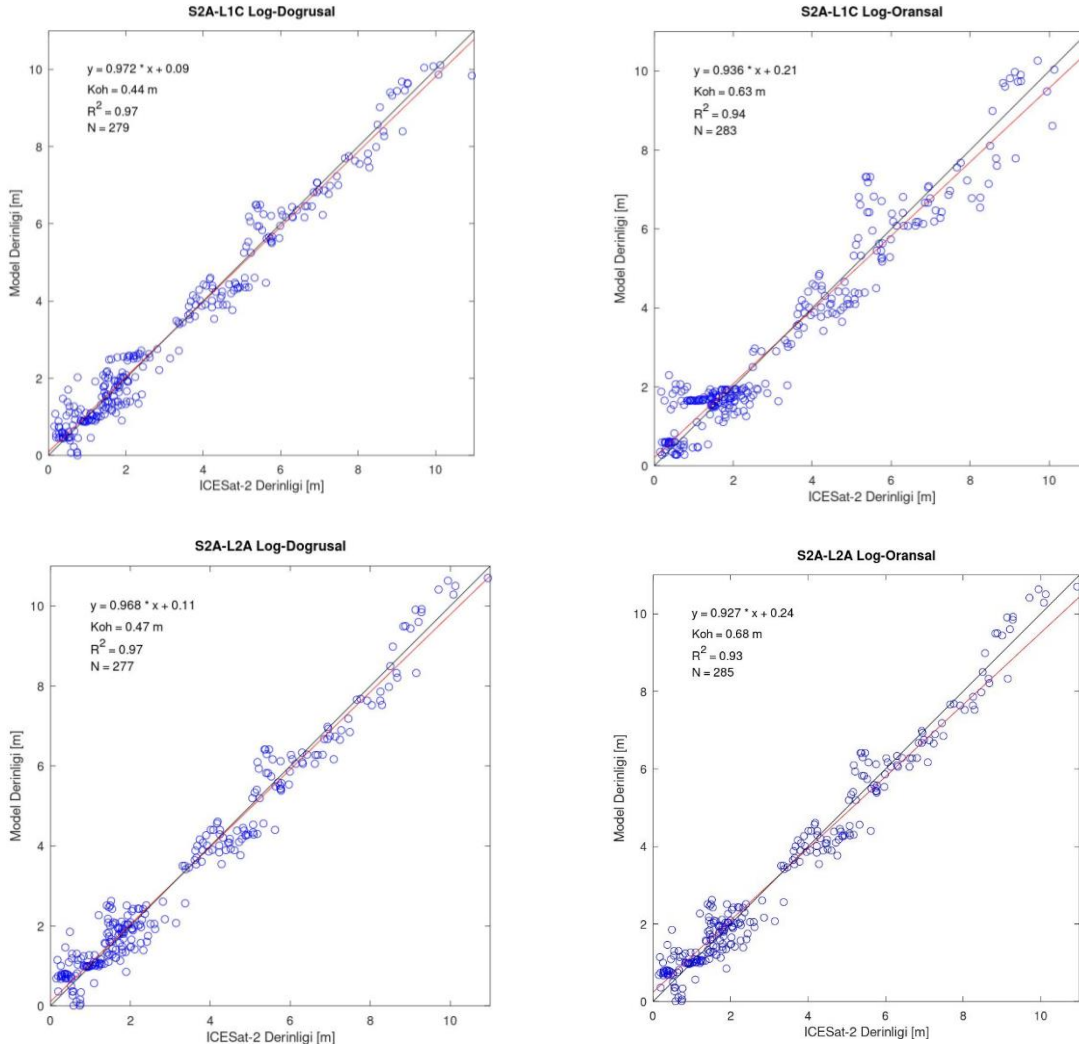
(3) ve (4) eşitliklerinin sol tarafındaki değerler ilgili noktalara ait ICESat-2'den elde edilen derinliklerdir. Bölüm 2.2'de de gösterildiği gibi ICESat-2'den elde edilen değerlere kırılma düzeltmesi getirilerek değerlendirme yapılmıştır. Log-doğrusal ve log-oran temelli modellere hangi bantların ve kombinasyonların dahil edilmesinin anlamlı olduğuna ise Akaike Bilgi Kriteri (ABK) (Akaike, 1973) çerçevesinde karar verilmiştir.

3. Bulgular

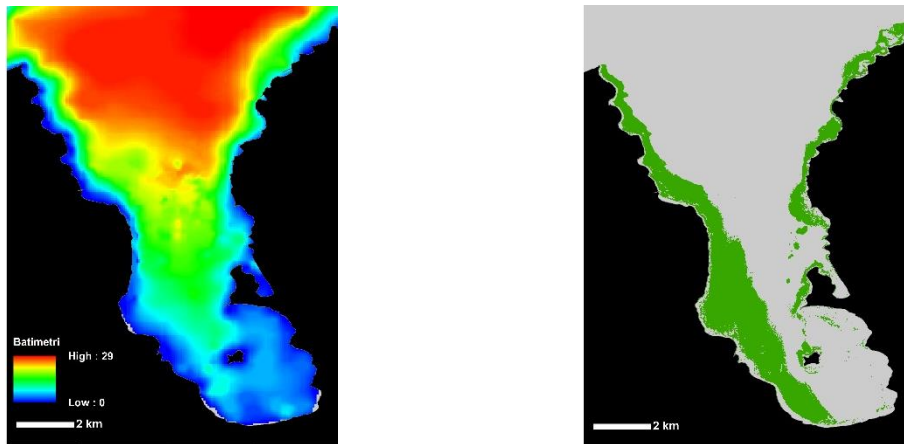
Multispektral görüntülerle deneysel yaklaşım kullanarak elde edilen batimetri haritası bağıl bir haritadır ve ölçeklenebilmesi için dışsal veriye ihtiyaç duyar. Bu çalışmada dışsal veri olarak kullanılan ICESat-2 derinlikleri (3) ve (4) eşitliklerinde verilen model parametrelerinin kestirilebilmesi için model katsayılarıyla beraber eğitme kümesini oluştururlar. Log-oransal ve log-doğrusal model parametreleri atmosferik düzeltme getirilmemiş atmosfer tavanı yansımalarını içeren L1C ve düzetme getirilmiş atmosfer tabanına ait L2A Sentinel-2 görüntülerinin her ikisi için de kestirilmiştir. Çoklu doğrusal regresyon modeli Sentinel-2'nin yalnızca kıyı aerosol, mavi ve yeşil bantları ile gerçekleştirilmiştir. Bu üç banda ilaveten kırmızı bandın da katkısının olup olmadığı test edilmiş, bu bandın dahil edilmesiyle ABK değeri az bir oranda düşmüş ancak doğruluk değeri anlamlı olarak değişmediğinden üç bantla hesaplama yapılması benimsenmiştir.

Eğitme kümesi ile yapılan kestirimlerle elde edilen dört çözüm Şekil 4'te sunulmaktadır. Şekildeki yatay eksenler ölçülen ICESat-2 derinlik değerlerini düşey eksenler ise model parametreleri ile hesaplanan derinlik değerlerini göstermektedir. Örnekleme noktalarında model uyumu %93 ve üzeri değerler olarak karşımıza çıkmaktadır. Yansıma değerleri için L1C veya L2A görüntüsünün altlık olarak alınması log-doğrusal ve log-oransal yaklaşımların her ikisi için de anlamlı farklar üretmemiştir. Ancak model katsayılarının hesabında log-doğrusal yaklaşım kullanılmasıyla log-oransala nazaran daha iyi doğruluk değerleri elde edilmiştir. L1C görüntüsü için log-doğrusal yaklaşım ile ± 0.44 m karesel ortalama hata kestirilirken log-oransalda bu değer ± 0.63 m'ye yükselmektedir. Çoklu doğrusal regresyon modeliyle hesaplanan derinlikler gerçek ICESat-2 derinliklerinden daha küçük olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca eğitme verisi sonuçlarına göre model derinlikleri ICESat-2 derinlik değerlerinden log-doğrusal yaklaşımda ~ 0.1 m diğer yöntemde ise ~ 0.2 m ötelenmiş daha derin değerler olarak elde edilmektedir.

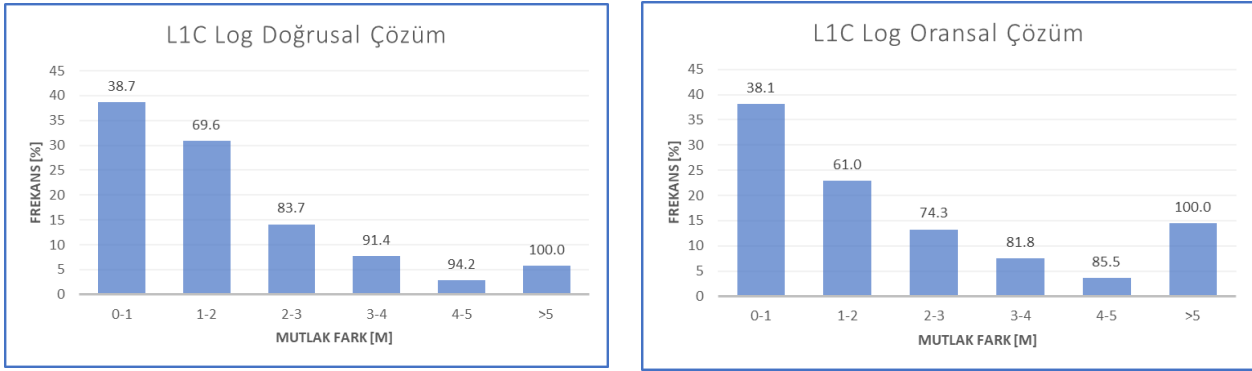
Eğitme aşamasında elde edilen regresyon model parametreleri ile görüntünün her bir pikselinin kıyı aerosol, mavi ve yeşil bant yansıma değerleriyle o piksel konumu için derinlik değerleri hesaplanmıştır. Atmosferik düzeltme getirilmiş L2A görüntüsüyle sonuçlarda anlamlı bir iyileşme olmadığından yalnızca L1C görüntüsü derinlik hesabında kullanılmıştır. Elde edilen batimetri haritası karşılaştırma öncesinde 5x5 ebatlı medyan filtrelemesine tabii tutulmuştur. Daha sonra yanal taramalı sonar ile üretilmiş 60 m grid aralıklı batimetri haritasının (bkz. Şekil 5 sol sütun) tüm grid orta noktaları Sentinel-2+ICESat-2 kombinasyonu ile elde edilen raster derinlik haritasına aktarılmış ve bu nokta konumlarına karşılık gelen derinlik değerleri doğrusal enterpolasyonla bulunmuştur. Sonar derinlik değerlerinden model derinlik değerleri çıkarılarak farklar hesaplanmıştır. Elde edilen farklar körfezde mevcut Posidonia Oceanica deniz çayırı konumlarında negatif işaretli oldukça büyük değerler olarak bulunduğu Şekil 5 sağ sütunda gösterilen deniz çayırı alanları değerlendirme dışı bırakılmıştır. Log-doğrusal ve log-oransal yaklaşımlar için ilgili farkların 1 m aralıklı frekans yüzdeleri ile kümülatif yüzde değerleri Şekil 6'da görülmektedir. Log-doğrusal çözümde sahadaki tüm karşılaştırma noktalarının %69.6'sında mutlak fark değeri 2 m'nin altında bulunmuştur. Mutlak değerce 5 m ve altında fark gösteren konumlar karşılaştırma noktalarının %94.2'sini oluşturmaktadırlar. Log-oransal çözümde bu sayı %85.5 olarak gözlemlenmiştir. Log-oransal çözümle elde edilen farkların mutlak değerlerinin 5 m üzerinde ortaya çıktığı nokta sayısı tüm noktaların %5.8'i iken bu oran log-doğrusal çözümde %14.5'dir. Log-oransal çözümde bu noktaların daha fazla oluşu, modelin oran ifadesi içermesi nedeniyle ortaya çıkan sayısal bir etkinin sonucudur.



Şekil 4: Sentinel-2A L1C (üstte) ve L2A (altta) görüntüleri kullanarak oluşturulan çoklu doğrusal regresyon modelinin log-doğrusal ve log-oransal yaklaşımlarıyla hesaplanan model derinlik değerlerinin ICESat-2 derinlik değerlerine bağlı değişimi.

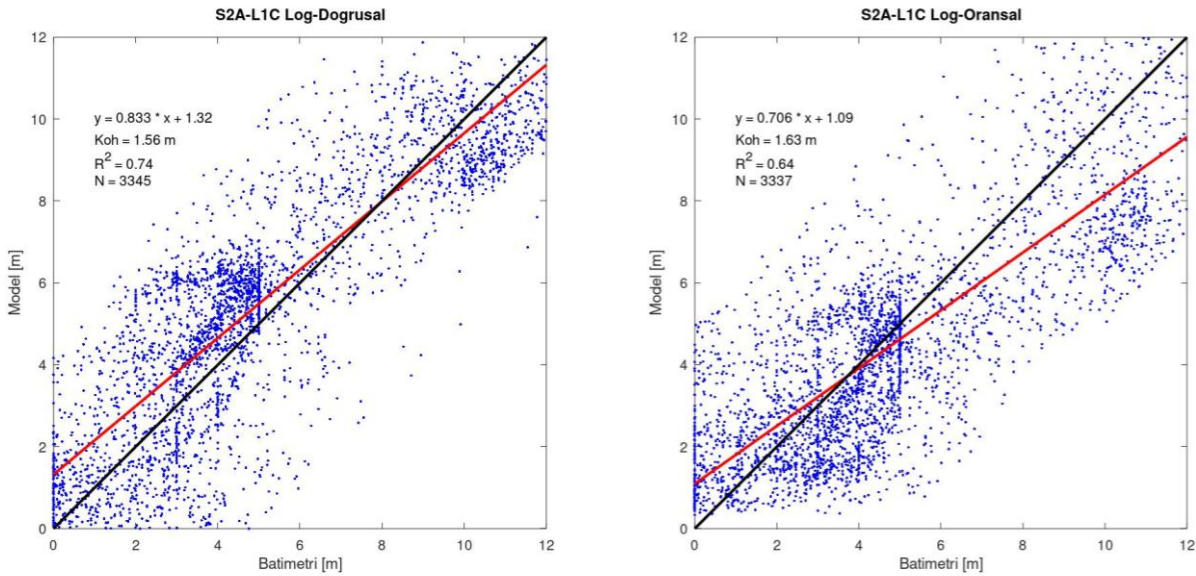


Şekil 5. (Sol) Yanal taramalı sonar ile üretilen 60 m grid aralıklı batimetri haritası. (Sağ) Alandaki Posidonia oceanica deniz çayırlarının dağılımını gösterir harita (Yücel - Gier vd., 2019).



Şekil 6: Yanal taramalı sonar batimetri haritası ile Sentinel-2+ICESat-2 kombinasyonu ile üretilen haritanın karşılaştırılması sonucunda bulunan farkların mutlak değerlerinin 1 m aralık içinde kalan nokta sayılarının tüm nokta sayılarına oranlarını gösterir yüzde değerleri ile kümülatif yüzdeler.

Eğitme verisi ile bulunan model parametrelerinin genelleme doğruluğu Şekil 7'deki grafikte sunulmaktadır. Grafiğin yatay eksenini hatasız olarak alınan akustik verilerle üretilmiş batimetri değerlerini, dikey eksen ise modelle hesaplanan derinlik değerlerini göstermektedir. Karşılaştırmada derinlik sınırı olarak 12 m alındığına dikkat edilmelidir. Log-doğrusal yaklaşım log-oransala kıyasla biraz daha iyi sonuçlar üretmiştir. ICESat-2 konumlarında elde edilen farklarla bulunan ve sonucu Şekil 4'te sunulan model, karesel ortalama hata ± 0.44 m ve model uyumu % 97 elde edilmişken modelin tüm çalışma alanına uygulanmasıyla bu değerler sırasıyla ± 1.56 m ve % 74 olarak bulunmuştur. ICESat-2 profilinin yalnızca taş ve kum taban malzemesinden olan bir bölgede elde edilmesi nedeniyle ideal, yüksek doğruluk gözlenmiştir. Öte yandan karşılaştırma yapılan konumlarda çamur varlığı da mevcuttur. Bir başka önemli husus uygun veri bulunamaması nedeniyle yalnızca bir ICESat-2 derinlik profilinden yararlanılabildiği olası durumudur. Bu profil tek başına alanın tümü göz önüne alındığında heterojen bir dağılım gösteren taban malzemesi ve su kalitesi çeşitliliğini temsil etmemekte bunun sonucunda da daha yüksek karesel ortalama hata değeri bulunmaktadır (Vinayaraj, Raghavan, & Masumoto, 2016).



Şekil 7: Yanal taramalı sonar batimetri derinlikleri ile Sentinel-2A+ICESat-2 kombinasyonu ile üretilen model derinliklerinin karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Sentinel-2 raster görüntüsü ile ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verileri kullanılarak İzmir Gülbahçe Körfezi'nin batimetri haritası üretilmiş ve bu haritanın doğruluğu test edilmiştir. Uydu görüntülerinden yararlanarak deniz tabanını ilgilendiren çalışmalarda ve batimetri haritası üretiminde, güneşten gelen ışınların su kütleleri tarafından soğurulmaları daha az olan elektromanyetik spektrumun mavi ve yeşil bölgesindeki bantların kullanılması gerekmektedir.

Batimetri haritası üretiminde Sentinel-2'nin kıyı aerosol, mavi ve yeşil bantlarındaki yansıma değerleri log-doğrusal ve log-oransal yaklaşımda kullanılarak çoklu doğrusal regresyon modeli uygulanmıştır.

Deniz çayırı olan konumlardaki ICESat-2 verileri eğitime verisine dahil edilmiş ancak bu konumlardaki yansıma değerlerinin düşük olmaları ve derinlikle değişen kontrast vermemeleri nedeniyle derinlik değerleri olması gerekenden daha büyük olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle deniz çayırı olan konumlar hem eğitime hem de model genellemesiyle bulunan batimetri haritasının gerçek batimetri haritasıyla karşılaştırmasında değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Uydu görüntüleriyle gerek deniz tabanı haritalanması gerekse de batimetri haritası üretilmesi çalışmanın yapılacağı sulardaki optik geçirgenlikle doğrudan ilişkilidir. Gülbahçe Körfezi'nde daha önce yapılan bir çalışmada, bu çalışmada kullanılan aynı tarihli Sentinel-2 görüntüsü kullanılarak optik geçirgenliğin ölçütlerinden olan Secchi Disk Derinliği (SDD) hesaplanmıştır (Yücel-Gier, Koçak, Akçalı, İlhan, & Duman, 2020). Buna göre çalışma sahasındaki ortalama SDD değeri 10-12 m civarında olup bu değer Sentinel-2 ve ICESat-2 kombinasyonu ile üretilen batimetri haritasının etkin olarak hesaplanabileceği limiti de belirlemektedir (Caballero, Stumpf & Meredith, 2019; Parrish vd., 2019).

Sentinel-2 ve ICESat-2'nin birlikte sinerjisiyle elde edilen batimetri haritaları farklı konumlarda yine farklı araştırmacılar tarafından üretilmiş ve test edilmiştir. Ma vd. (2020) çalışmalarında maksimum derinliğin %10'una kadar bir doğruluk gözlemlenmiştir. Üç farklı konumda gerçekleştirilen doğrulama çalışmalarında Thomas vd. (2021) ise bu oranı %15 olarak vermektedirler. Thomas vd. (2021)'nin çalışma alanlarından biri Girit adasının kuzeybatısında yer almakta ve iklim ve su kalitesi itibarıyla Gülbahçe Körfezi'ne benzer özellikler göstermektedir. Çalışmalarında optik geçirgenliği daha yüksek olmasına rağmen 22 m derinliğe kadar farklı yöntemlerle batimetrik derinlik elde edebildiklerini belirtmektedirler. Uyguladıkları üç farklı yöntemden en iyi sonucu veren yöntemle ± 2.19 m karesel ortalama hata değeri ile $0.89 R^2$ uyum değeri bulunmuşlardır. Bu değer maksimum derinliğin %10'una tekabül etmektedir. Bu çalışmada 12 m maksimum derinlikle ± 1.56 m karesel ortalama hata bulunmuş bu da maksimum derinliğin %13'ünü oluşturmaktadır. Aradaki fark Girit çalışma alanındaki optik geçirgenliğin, Gülbahçe Körfezi'ndekinden daha iyi olmasıyla açıklanabilir.

Sentinel-2 ve ICESat-2 verilerinin kombinasyonu ile oluşturulan batimetri haritasının doğruluğunun navigasyon için gerekli Uluslararası Hidrografi Örgütü (International Hydrographic Organization, IHO) standartlarını sağlamadığı belirlenmiştir (IHO, 2020). Bu sadece Sentinel-2 ve ICESat-2 tabanlı batimetri haritaları için değil aynı zamanda Landsat 8 uydu görüntüleriyle elde edilen batimetri haritaları için de tespit edilmiş bir durumdur (Kılıç Güngör, 2019; Açar, 2021). Ancak erişilemeyen uzak konumlardaki sığ sulara batimetri haritaları navigasyon dışındaki diğer kullanım amaçları için Sentinel-2 ve ICESat-2 kombinasyonu ile üretilebilir. Sentinel-2 görüntüsü kullanmanın avantajı beş günlük zamansal çözünürlüğe sahip olması nedeniyle batimetri haritası üretilecek alanın en uygun atmosfer ve su koşuluna sahip görüntülerini elde etme şansının yüksek olmasıdır. Burada en önemli problem aynı yörüngeden geçiş zaman aralığının 91 gün olması nedeniyle ICESat-2 uydusundan uygun derinlik profillerinin temininde ortaya çıkabilecektir.

Teşekkür

Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü'nden Prof. Dr. Muhammet Duman'a Gülbahçe Körfezi'ne ait batimetri haritasını, Avrupa Uzay Ajansının Sentinel Veri Merkezi'ne Sentinel-2 uydu görüntülerini ve OpenAltimetry platformuna ICESat-2 ATL03 verilerini teminleri için içten teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- Açar, K. (2021). *Hidrografik Mesaha Planlama Aşamasında Uydu Tabanlı Batimetrik Veri Kullanımının Araştırılması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye
- Ağca, M. (2020). PALS, ICESat/GLAS ve ICESat-2 Lazer Sistemleri ve Kullanım Alanları. *Geomatik*, 5(1), 27-35.
- Akaike, H. (1973). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In B. N. Petrov, & F. Csaki (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory*, 267-281. Budapest
- Caballero, I., Stumpf, R. P., & Meredith, A. (2019). Preliminary assessment of turbidity and chlorophyll impact on bathymetry derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A satellites in South Florida. *Remote Sensing*, 11(6), 645.
- Chen, B., Yang, Y., Xu, D., & Huang, E. (2019). A dual band algorithm for shallow water depth retrieval from high spatial resolution imagery with no ground truth. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 1-13.
- Chust, G., Grande, M., Galparsoro, I., Uriarte, A., & Borja, Á. (2010). Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(3), 200-213.
- ESA. (2015). Sentinel –2 user Handbook (2nd ed.). *European Space Agency Standard Document*, 64.
- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 103-116.
- Hodúl, M., Bird, S., Knudby, A., & Chénier, R. (2018). Satellite derived photogrammetric bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 268-277.
- International Hydrographic Organization (IHO) (2020). *IHO Standards for Hydrographic Surveys (6th Edition)*. IHO Publication S-44. Monaco.
- Kay, S., Hedley, J. D., & Lavender, S. (2009). Sun glint correction of high and low spatial resolution images of aquatic scenes: a review of methods for visible and near-infrared wavelengths. *Remote Sensing*, 1(4), 697-730.
- Khalsa, S. J. S., Borsa, A., Nandigam, V., Phan, M., Lin, K., Crosby, C., Fricker H., Baru, C., Lopez, L., & Lopez, L. (2020). OpenAltimetry-rapid analysis and visualization of Spaceborne altimeter data. *Earth Science Informatics*, 1-10.
- Kılıç Güngör, B. (2019). *Uydu Görüntüleri Yardımı ile Batimetrik Harita Üretimi: Kozlu Balıkçı Barınağı Örneği* (Yüksek lisans tezi) Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye.
- Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., & Brando, V. E. (2020). Remote sensing of shallow waters—a 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619.
- Lamy, P., Citores, A., Deidun, A., Evans, L., Galgani, F., Heffernan, P., Karageorgis A., Kauppi L., Manakovski D., Meissner G., Moldoveanu V., Ramm K., Pedicchio, M. C., Pitta e Cunha, T., Slat, B., & Pons, G. (2020). Mission Starfish 2030: Restore our ocean and waters. *Report of the Mission Board Healthy Oceans, Seas, Coastal and Inland Waters*.
- Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G., & Patch, J. S. (1998). Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Applied Optics*, 37(27), 6329-6338.
- Lee, Z., Carder, K. L., Mobley, C. D., Steward, R. G., & Patch, J. S. (1999). Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 38(18), 3831-3843.
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379-383.
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251-2259.
- Ma, Y., Xu, N., Liu, Z., Yang, B., Yang, F., Wang, X. H., & Li, S. (2020). Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets. *Remote Sensing of Environment*, 250, 112047.
- Mobley, C. D. (2010). Optical properties of water. *Handbook of optics*, 4, 1.3-1.53.

- Neumann, T. A., Martino, A. J., Markus, T., Bae, S., Bock, M. R., Brenner, A. C., Brunt, K.M., Cavanaugh, J., Fernandes, S.T., Hancock D.W., Harbeck, K., Lee, J., Kurtz N.T., Luers P.J., Luthcke S.B., Magruder L., Pennington P.A., Ramos-Izquierdo, L., Rebold T., Skoog J., & Thomas, T. C. (2019). The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite–2 Mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111325.
- Neumann, T. A., Brenner, A., Hancock, D., Robbins, J., Saba, J., Harbeck, K., Gibbons, A., Lee, J., Luthcke, S. B., Rebold, T. vd. (2021). ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 4 (ATL03), Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL03.004>, (Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2021).
- Parrish, C. E., Magruder, L. A., Neuenschwander, A. L., Forfinski-Sarkozi, N., Alonzo, M., & Jasinski, M. (2019). Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. *Remote Sensing*, 11(14), 1634.
- Philpot, W. D. (1989). Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, 28(8), 1569-1578.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (Eds.). (2019). *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: A Special Report by the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48, 547-556.
- Thomas, N., Pertiwi, A. P., Traganos, D., Lagomasino, D., Poursanidis, D., Moreno, S., & Fatoyinbo, L. (2021). Space-Borne Cloud-Native Satellite-Derived Bathymetry (SDB) Models Using ICESat-2 And Sentinel-2. *Geophysical Research Letters*, 48(6).
- Tozer, B, Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Olson, C., Beale, J. R., & Wessel, P. (2019). Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6, 1847.
- United Nations (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. New York.
- Vangi, E., D'Amico, G., Francini, S., Giannetti, F., Lasserre, B., Marchetti, M., & Chirici, G. (2021). The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination. *Sensors*, 21(4), 1182.
- Vinayaraj, P., Raghavan, V., & Masumoto, S. (2016). Satellite-derived bathymetry using adaptive geographically weighted regression model. *Marine Geodesy*, 39(6), 458-478.
- Yücel-Gier, G., Koçak, G., Akçalı, B., İlhan, T., & Duman, M. (2019). Mapping of *Posidonia oceanica* (L.) Delile in the bay of Gülbahçe. *Proceedings of the Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*. Antalya, Turkey, 98-102.
- Yücel-Gier, G., Koçak, G., Akçalı, B., İlhan, T., & Duman, M. (2020). Evaluation of *Posidonia oceanica* Map Generated by Sentinel-2 Image: Gülbahçe Bay Test Site. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 20(7), 571-581.
- URL-1: <https://www.oceansofbiodiversity.auckland.ac.nz/2019/03/23/the-ocean-floor-is-less-well-mapped-than-the-surface-of-other-planets/> (Erişim Tarihi: 27 Mart 2021).
- URL-2: Copernicus Sentinel-2 Veri Sunucusu, <https://scihub.copernicus.eu/> (Erişim Tarihi: 15 Mart 2021).

En uygun rüzgâr enerji santrali yerlerinin coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi: Kocaeli ili örneği

Serdar Ekiz^{1*} , Ahmet Şirin¹ , Arzu Erener¹ 

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İzmit, Kocaeli, Türkiye.

Öz: İnsanlar yaşamları boyunca, birçok gereksinimlerini yerine getirmek için enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için ise, öncelikle enerjinin üretimi ve buna paralel olarak enerjinin üretileceği alanların tespiti önem kazanmıştır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisini kullanarak, elektrik enerjisi elde eden rüzgâr enerji santrallerinin (RES) inşası için, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında çeşitli faktörler dikkate alınarak en uygun yer araştırması yapılmıştır. İlk olarak, geçmişte yapılan benzer çalışmalardan yola çıkılarak, RES yer seçimi sürecinde etkisi bulunan 13 faktör belirlenmiştir. Bunlar; rüzgâr hızı, korunan alanlar, kuş göç yolları, trafo merkezleri, enerji nakil hatları, yerleşim alanları, karayolları, fay hatları, yükseklik, eğim, akarsular, göller ve havaalanlarıdır. Belirlenen bu faktörler kendi içlerinde, 0 (uygun değil) – 5 (son derece uygun) arasında olmak üzere 6 puan sınıfına ayrılmıştır. Daha sonra, RES için uygun olmayan puan sınıfında (0) bulunan alanlar, diğer puan sınıfındaki alanlardan ayrıştırılarak bir maske alanı haritası oluşturulmuştur. Elde edilen maske alanı haritası ile, RES için uygun olan ve olmayan alanlar net bir şekilde belirlenmiştir. Uygun olan alanların, uygunluk derecelerine göre sınıflandırılabilmesi için ise ağırlıklı çakıştırma yöntemi kullanılmıştır. Ağırlıklı çakıştırma yöntemi uygulanırken, faktörlerin birbirlerine göre ağırlıkları 2 farklı şekilde belirlenmiştir. İlk çalışmada, Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) kullanılarak faktörler ağırlıklandırılmış ve üst üste çakıştırma analizi yapılmıştır. İkinci çalışmada ise, ağırlıklı çakıştırma analizi faktörler eşit ağırlıkta kabul edilerek uygulanmıştır. İki farklı analiz sonucunda elde edilen haritalar, maskeleme alanı ile örtüştürülerek, Kocaeli için RES uygunluk haritaları elde edilmiştir. Elde edilen sonuç uygunluk haritaları üzerinden, uygunluk sınıfları için alan hesaplamaları yapılmış ve iki yöntem birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, Kocaeli ilinin tamamı üzerinde yapılan bu çalışmada CBS ve AHY kullanılarak, RES kurulabilecek en uygun alanlar tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: CBS, Rüzgâr enerji santrali, En uygun yer seçimi, Çok kriterli karar analizi, AHY, Kocaeli

Determination of the most suitable wind power plant locations with geographical information systems: Kocaeli province example

Abstract: In their lifetime, people need the energy to fulfill their needs. Beforehand, production of energy and, in parallel, the determination of the areas where the energy will be produced has gained importance. In this study, the most suitable site research was carried out in the Geographic Information Systems (GIS) for the construction of wind power plants (WPP) for the environment. It obtains electrical energy by using wind energy, which is one of the renewable energy sources. First of all, 13 factors that have an impact on the WPP site selection process were determined based on similar studies conducted in the past, these are; wind speed, protected areas, bird migration routes, transformer centers, power transmission lines, residential areas, highways, fault lines, elevation, slope, streams, lakes and airports. These determined factors are divided into 6 score classes, ranging from 0 (not suitable) to 5 (extremely appropriate). Then, a mask area map was created by separating the areas in the score class (0) not suitable for WPP from the areas in the other score class. With the mask area map obtained, suitable and unsuitable areas for WPP were clearly determined. The weighted overlay method was used to classify the suitable areas according to their degree of suitability. While applying the weighted overlay method, the weights of the factors with respect to each other were determined in two different ways. In the first study, the factors were weighted and overlapping analysis was performed by using the Analytical Hierarchy Process (AHP), which is one of the Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods. In the second study, weighted overlapping analysis was applied by accepting the factors as equally weighted. By overlapping the maps obtained as a result of two different analyzes with the masking area, WPP suitability maps for Kocaeli were obtained. Area calculations were made for the suitability classes over the resulting suitability maps and the two methods were compared with each other. As a result of this study, which was carried out on the entire province of Kocaeli, the most suitable areas where WPP could be established were determined by using GIS and AHP.

Keywords: GIS, Wind power plants, The most suitable location selection, Multi-criteria decision analysis, AHP, Kocaeli

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Tel: +90 533 407 69 77

Geliş Tarihi/Received: 27.05.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 02.08.2021



0000-0003-2002-7190, serdar.ekiz@icloud.com (Ekiz S.)*
0000-0003-0459-2421, srnahmet98@gmail.com (Şirin A.)
0000-0002-9168-4254, arzu.erenner@kocaeli.edu.tr (Erener A.)

1. Giriş

Dünya nüfusunun artması sonucunda enerji kaynakları konusunda büyük bir arz ve talep oluşmakta ve birinci elden kullanılabilen enerji kaynakları gün geçtikçe tükenmektedir. Bu durum diğer dünya ülkelerini olduğu gibi, ülkemizi de enerji üretimi konusunda farklı yollar aramaya itmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları 7 gruba ayrılmaktadır. Bunlar, rüzgâr enerjisi, hidrolik enerji, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrojen enerjisi ve dalga enerjisidir (Koç, Yağlı, Koç, & Uğurlu, 2018). Çevreye en az zarar veren enerji üretim biçimi rüzgâr enerjisidir. Herhangi bir karbon salınımı olmadığı için çevre kirliliğine ve küresel ısınmaya yol açmaz. Hammadde sıkıntısı olmadığı için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisi enerji üretimi için, rüzgâr akımının yoğun, güçlü ve sürekli olduğu düz alanlara ihtiyaç duyar. Dünya üzerinde kullanılacak ve dönüştürülecek en uygun yenilenebilir enerji kaynaklarından birisidir ve bu dönüşümü yapan santrallere rüzgâr enerji santralleri (RES) adı verilmektedir (Şimşek, 2020).

Rüzgâr enerjisinin ülkemizde verimi en yüksek olan yenilenebilir enerji kaynağı olduğu ve yatırımlarının da bu bağlamda yıldan yıla artışı gözle görülmektedir. Ülkemizde rüzgâr enerjisinin durumuna bakılacak olursa, ilk rüzgâr enerjisi santrali 1.5 MegaWatt (MW) kapasite ile 1998 yılında İzmir'in Çeşme ilçesinde kurulmuştur. 1998 yılından 2005 yılına kadar rüzgâr enerjisi santrali alanında ciddi gelişmeler yaşanmamıştır. Mayıs 2005 tarihinde yürürlüğe giren 5346 numaralı Yenilenebilir Enerji Kanunu (YEK) ve gelişen teknoloji ile, rüzgâr enerjisi alanında girişimler hızlı bir ilerleme kaydetmeye başlamıştır (URL-1). Buna bağlı olarak, rüzgâr enerji santralleri için en uygun lokasyonların tespiti önem arz etmektedir. Bu analiz ve değerlendirmelerin içeriğinde, rüzgâr enerjisini ve kurulacak rüzgâr enerji santralini etkileyen, kurulum aşamasında dikkat edilmesi gereken çeşitli faktörler mevcuttur. Rüzgâr enerji santralini kurulumu için konumun önemli bir başlık olması ve bu konuma birden fazla faktörün etki etmesi, bu faktörleri uygunluk analizleri içerisinde kullanarak, bir rüzgâr enerji santrali için en uygun hangi konumların seçilebileceği gibi coğrafi bilgi sistemleri (CBS) uygulamaları yapılmasını zorunlu kılmıştır. Faktör verilerinin elde edilmesi, uygunluk analizleri içerisinde öncelik sıralamasına sokulması ve faktörlere ağırlık verilmesi, uygulamaların sağlıklı bir sonuç vermesi açısından önemlidir.

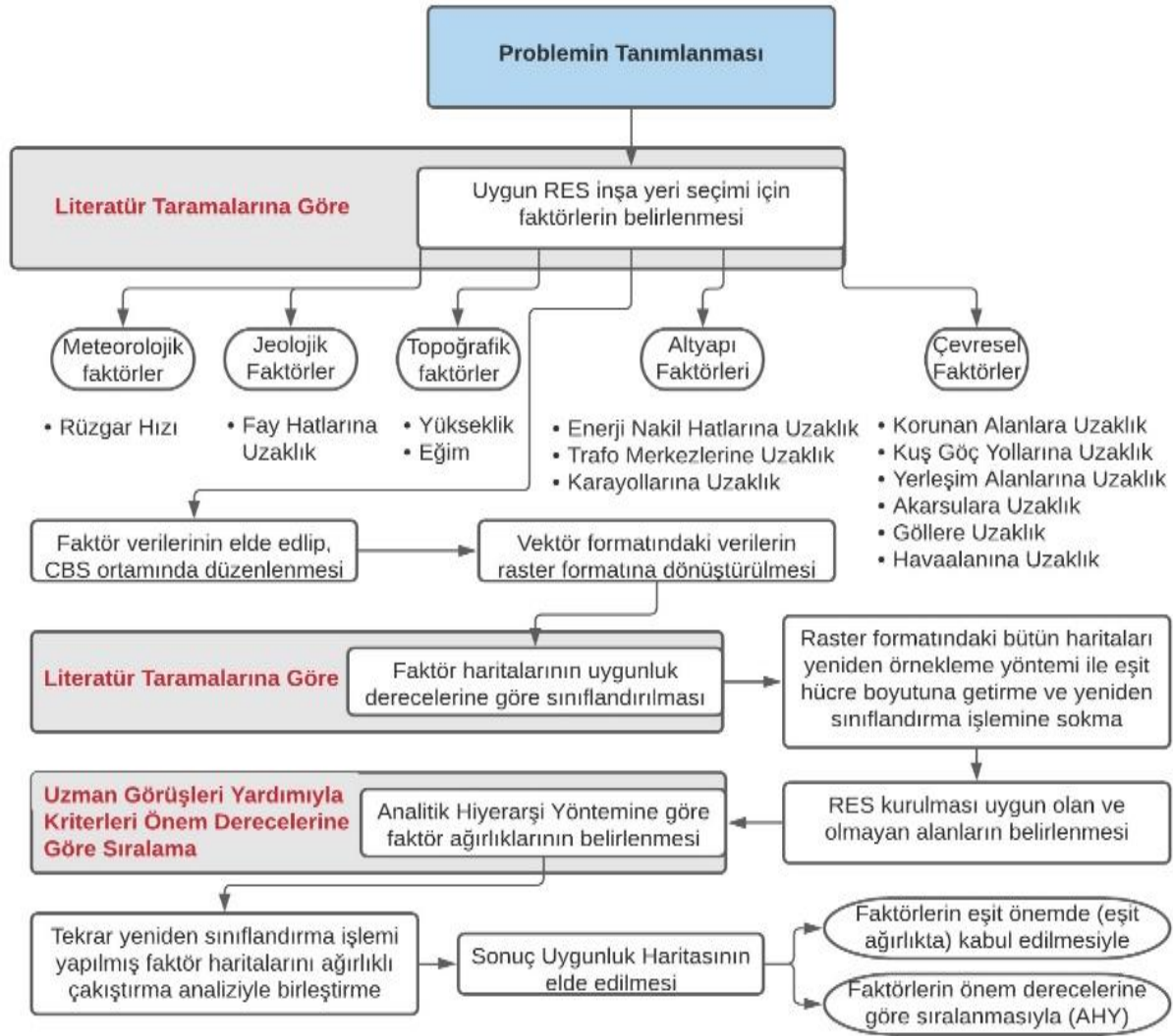
RES kurulumu için, CBS yardımıyla en uygun yer seçimi çalışmaları başlığı altında incelenen tez ve makalelerde, (Aitzhanov, 2016; Arca & Çıtıröğlü, 2020; Artun, 2020; Atıcı, Şimşek, Ulucan, & Tosun, 2015; Aydın, Kentel, & Düzgün, 2009; Baban & Parry, 2000; Bennui, Rattanamane, Puetpaiboon, Phukpattaranont, & Chetpattananondh, 2007; Can & Yücel, 2019; Latinopoulos & Kechagia, 2015; Memduhoğlu, Özmen, Göyçek, & Kılıç, 2014; Özşahin & Kaymaz, 2013; Sunak, Höfer, Siddique, Madlener, & Doncker, 2015; Şimşek, 2020; Urfalı & Eymen, 2021) çoğunlukla Çok Kriterli Karar Analizi (ÇKKA) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Yöntemi'nin (AHY) tercih edildiği göze çarpmaktadır. Bu çalışmalarda farklı sayıda kriterler (faktörler) ele alınmış olmasına rağmen, en az sayıda kriterle yapılan çalışmalarda bile bazılarının mutlaka yer aldığı görülmüştür. Bu kriterler, rüzgâr hızı, rüzgâr kapasite faktörü, rüzgâr güç yoğunluğu verilerinden biri ya da birkaçı, enerji nakil hatları ve trafo merkezleri verilerinden biri ya da her ikisi, eğim bilgisi verisi, karayolları verisi, yerleşim alanları verisi olarak sayılabilir. Bu kriterler harici oluşan verilerin ise genel olarak bütünden özele inerek elde edildiği söylenebilir. Örneğin; arazi kullanım verisini direkt olarak kendi içinde sınıfa ayırmak yerine içindeki verileri bölerek, ormanlar, yerleşim birimleri, endüstriyel alanlar, korunan alanlar vb. gibi ayrı ayrı haritalara dönüştürüp, kriter sayısını artırarak analize sokmak mümkündür. Ayrıca yapılan çalışmalarda kriterlerin gerek birbirlerine göre önem sıralarının gerekse kendi içlerinde yapılan uygunluk sınıflarına bölme işlemlerinin, uzman görüşlerine, incelenen çalışmalara veya ülkelerin yönetmeliklerine göre hemen her çalışma için farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında ÇKKA yöntemlerinden biri olan AHY ile, çalışma alanı içerisinde rüzgâr enerji santrali kurulumuna etki eden faktörlerin ağırlıkları belirlenerek, Kocaeli ili için kurulabilecek, en uygun RES alanlarının tespiti yapılacaktır.

Verilen bu bilgiler ışığında çalışmanın temel amaçları; RES'lerin yer seçimine etki eden faktörlerin belirlenmesi, etki eden faktörlerin önceliklerinin belirlenmesi ve AHY ile ağırlıklarının hesaplanması, Kocaeli ili için en uygun RES yerlerinin tespit edilmesi, etki eden faktörlere ayrıca eşit ağırlıklar verilerek uygun yerlerin bulunması ve ağırlıkları AHY ile bulunan en uygun yerler ile karşılaştırılması, Kocaeli ili içerisinde daha önceden yapılan RES'lerin konumlarının, çalışma kapsamında bulunan en uygun yerler ile örtüşüp örtüşmediğinin tespit edilmesiyle doğrulama yapılması ve bulunan sonuçların yorumlanması olarak ifade edilebilir.

2. Metodoloji

Uygulamada kullanılacak kriterler benzer çalışmalar incelenerek belirlenmiştir. Belirlenen kriterler için raster ve vektör formatında veriler elde edilip, uygulamada kullanılacak olan CBS yazılımına aktararak (ArcGIS 10.8), gerekli görülenler için kesme ve koordinat sistemi dönüşümü işlemleri yapılmıştır. Ağırlıklı çakıştırma işlemi yapabilmek için raster verilere ihtiyaç olduğundan, vektör formatında veriler mesafe (uzaklık) analizleri yapılarak raster verilere dönüştürülmüştür. Bütün veriler raster formatına dönüştürüldükten sonra, yapılan benzer çalışmalardan yola çıkılarak uygunluk sınıflarına bölünmüştür. Ayrıca raster veri tipinde olan bütün haritalar eşit hücre boyutuna (100 x 100) getirilmiştir. Sonra kriterler 1 (1, 2, 3, 4, 5 puanlılar dahil olmak üzere tüm uygun olan alanlar), 0 (uygun olmayan alanlar) olmak üzere iki sınıfa bölünmüş, veriler üst üste çakıştırılmış ve RES için uygun olan ve olmayan alanlar (maskeleme haritası) haritası elde edilmiştir. Daha sonra bilirkişi görüşleri yardımıyla kriterler önem derecelerine göre sıralanmış ve AHY ile ağırlıkları belirlenmiştir. Bütün veriler yeniden sınıflandırma işlemine tabi tutulmuş ve belirlenen ağırlıklarıyla, uygun olan alanları kendi içinde sınıflandırabilmek için üst üste çakıştırılmıştır. Bu işlem, farklı bir bakış ve karşılaştırma olması açısından, kriterler eşit ağırlıkta kabul edilerek bir kere daha yapılmıştır. Son olarak, elde edilen ağırlıklı çakıştırma haritaları, maskeleme haritası ile örtüştürülerek, sonuç uygunluk haritaları ve sınıfları elde edilmiştir. Sonuç uygunluk haritaları, ilk olarak AHY ile belirlenen ağırlıklara göre, ikinci olarak ise kriterler eşit ağırlıkta kabul edilerek iki farklı şekilde sunulmuş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Çalışmaya ait iş akışı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1: İş akış diyagramı

3. Çalışma Alanı ve Veriler

Ülkemizde T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün rüzgâr enerjisi ile ilgili yaptığı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar ışığında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen, rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. REPA bilgilerine göre, Aralık 2020 sonu itibariyle, Türkiye rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 8.832 MW, toplam elektrik üretimi içerisindeki payı %8.09 olmuştur (URL-2). Çalışma kapsamında, Kocaeli ili içerisinde daha önce yapılmış veya mevcut durumda kurulumu devam eden RES'lerin varlığı (Şekil 2), Kocaeli ilinin ülke ekonomisi bakımından yoğun bir sermaye pazarı haline dönüşmesi ve bu nedenle yapılabilecek RES'ler için de yüksek yatırıma uygun oluşu ve ilin bir geçiş bölgesi olması gibi nedenler, Kocaeli ilinin seçimi için başlıca etkenlerdir.

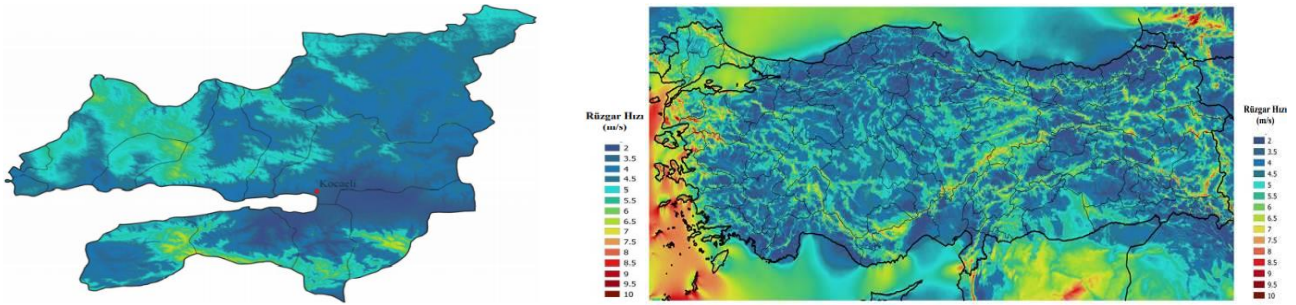
RES yapımı için rüzgâr hızı çok önemli bir faktördür. Bu çalışmada REPA'nın sağladığı Kocaeli ili için 100 metrede yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı haritası kullanılmıştır. Ayrıca, Türkiye 100 metrede yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımı haritası da Şekil 3 üzerinden incelenebilir.

Çalışma içerisinde uygulamaların verilerle entegre olarak en uygun doğrulukta sonuçlar çıkarabilmesi amacıyla, tüm haritalar

TUREF TM30 projeksiyonunda tanımlanmıştır.



Şekil 2: Kocaeli il haritası ve içerisindeki RES konumları (RES Konumları Kaynağı: (TÜREB, 2020))



Şekil 3: (sol) REPA Kocaeli ili 100 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılım haritası, (sağ) REPA Türkiye geneli 100 metre yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılım haritası (URL-3)

Çalışmada kullanılan faktörler aşağıdaki tablo üzerinde gösterilmiştir. Bazı veriler kaynağından direkt elde edildiği şekilde, bazıları ise sayısallaştırma işlemi yapılarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan faktörlerin verileri CBS yazılım programı üzerinde düzenlendikten sonra ilk olarak, geçmişte yapılan çalışmalar incelenerek, RES için uygun olmayan alan olarak kabul edilen veri sınıfları belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Dikkate alınan faktörler ve RES için uygun olmayan sınıfları

Faktör	Verinin Yapısı	Verinin Kullanım Şekli	Verinin Türü	Verinin Kaynağı	Faktörün Uygun Olmayan Sınıfları	Sınıflandırma Kaynağı
Rüzgâr Hızı	Raster	Sayısallaştırma	Nokta (Point)	REPA (URL-3)	< 5 m/s	(Baban & Parry, 2000; Özşahin & Kaymaz, 2013)
Korunan Alanlar	Vektör	Direkt	Alan (Polygon)	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 2000 m	(Atıcı vd., 2015; Bennui vd., 2007)
Kuş Göç Yolları	Raster	Sayısallaştırma	Çizgi (Line)	birdmap.5dvision.ee (URL-5)	< 500 m	(Aitzhanov, 2016; Aydın vd., 2009)
Trafo Merkezleri	Vektör	Direkt	Nokta	Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş. (SEDAŞ) Kocaeli Bölgesi	> 25000 m	(Özşahin & Kaymaz, 2013; Urfalı & Eymen, 2021)
Enerji Nakil Hatları	Vektör	Direkt	Çizgi	SEDAŞ Kocaeli Bölgesi	< 100 m ve > 10000 m	(Sunak vd., 2015) / (Baban & Parry, 2000)
Yerleşim Alanları	Vektör	Direkt	Alan	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 2000 m	(Atıcı vd., 2015; Aydın vd., 2009; Baban & Parry, 2000)
Karayolları	Vektör	Direkt	Çizgi	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 100 m ve > 10000 m	(Baban & Parry, 2000; Urfalı & Eymen, 2021) / (Baban & Parry, 2000)
Fay Hatları	Raster	Sayısallaştırma	Çizgi	MTA (URL-6)	< 1000 m	(Can & Yücel, 2019; Arca & Çitiroğlu, 2020; Artun, 2020)
Sayısal Yükseklik Modeli	Raster	Direkt	Piksel	USGS Earth Explorer (URL-7)	> 1500 m	(Atıcı vd., 2015; Can & Yücel, 2019)
Eğim	Raster	Sayısal Yükseklik Modelinden Üretilerek	Piksel	Sayısal Yükseklik Modeli	> % 30	(Aitzhanov, 2016; Özşahin & Kaymaz, 2013; Sunak vd., 2015; Şimşek, 2020)
Akarsular	Vektör	Vektör	Çizgi	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 3000 m	(Aitzhanov, 2016; Atıcı vd., 2015)
Göller	Vektör	Vektör	Alan	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 3000 m	(Aitzhanov, 2016; Atıcı vd., 2015)
Havaalanı	Vektör	Vektör	Alan	© OpenStreetMap Katılımcıları (URL-4)	< 3000 m	(Bennui vd., 2007; Latinopoulos & Kechagia, 2015; Urfalı & Eymen, 2021)

4. Yöntem

Günümüzde RES yapımı için bilgi teknolojilerine dayalı sistemler kullanılabilir. CBS uygulamaları içinde en çok kullanılanı, ÇKKA yöntemlerinden biri olan AHY'dir. Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytic Hierarchy Process, AHP) olarak tanımlanan AHY 1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından ortaya çıkarılmıştır. Bu konudaki ilk yazılı eser, Saaty'nin 1980 yılında yayımlanan "The Analytic Hierarchy Process" adlı eseridir. Bu eser sonrasında AHY kullanılarak pek çok uygulamalı ve teorik çalışmalar yapılmıştır (Demirci, 2019; Tütek, Gümüšoğlu, & Özdemir, 2012). AHY sayesinde fiziksel ve sosyal olguların birlikte ölçülmesi mümkün hale gelmiştir (Saaty & Vargas, 2001). AHY, akılcı yönü, hızlı bir şekilde problemi çözmeye odaklanması, problemin yapısında bulunan faktörler arasında öncelikli ve baskın olanı bilmeye ve deneyimlemeye imkân vermesi, problemi, içerdiği etki ve ilişkilerle birlikte bütünsel bir modelde geliştirme imkânı sunması gibi avantajları bakımından çokça tercih edilen bir yöntemdir (Güler, 2016; Saaty, 1994). İlgili bu yöntem sayesinde RES yapımında etkili olan faktörler önem derecelerine göre sıralanarak, farklı formüller yardımıyla ağırlıkları bulunur. Bunun ardından çalışma alanı içerisinde, CBS yardımıyla en uygun konumlar belirlenerek, yüklenici firmanın kullanacağı rüzgâr türbini modeline göre, konum seçimi yapılabilir duruma gelmiş olur.

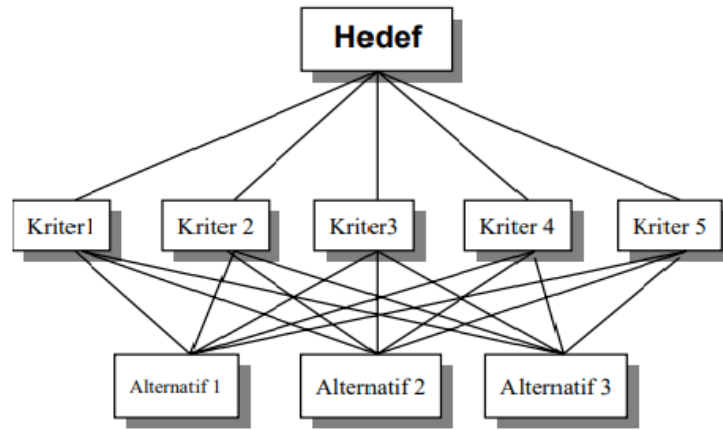
Saaty AHY'nin temelini yansıtan 4 aksiyom tanımlamıştır (Saaty, 1986; Saat, 2000):

- Aksiyom 1 – Terslik Koşulu: Karar veren kişi, karşılaştırmalar yapmalı ve tercihlerin gücünü belirleyebilmelidir.

Bu tercihlerin gücü belirlenirken terslik koşulu sağlanmalıdır. Eğer A kriteri B kriterine göre 5 kat daha öncelikliyse, B kriteri A'ya göre 1/5 kat öncelikli kabul edilmelidir. Bu koşulun uygulanmaması, problemin ya da öncelik kıyaslamalarının yeterince açık olmadığını veya doğru belirtilmediğini gösterir.

- Aksiyom 2 – Homojenlik: Benzer öğelerin karşılaştırılması gerektiğini ifade eder. Örneğin bir elma ile bir karpuz büyüklük açısından karşılaştırıldığında fark büyük olacaktır. Bu durumda karşılaştırılan öğelerin kümelendirilmesi gerekir.
- Aksiyom 3 – Bağımsızlık: Tercihler yapıldığı zaman, kriterler alternatiflerin özelliklerinden bağımsız olarak kabul edilir.
- Aksiyom 4 – Beklentiler: Beklentileri temsil edecek sonuç için tüm kriterlerin hiyerarşide yer aldığından emin olunmalıdır. Bu koşulun ihlal edilmesi halinde karar veren kişi, tüm kriterleri kullanmamış ve yetersiz bir sonuca ulaşmış olur.

Karar problemi için, problemin hedefini, kriterlerini ve alternatiflerini belirten hiyerarşik bir yapı kurulmalıdır. İlk aşamada hedef belirlenir ve herhangi bir karşılaştırma yapılmaz. İkinci aşamada bütün kriterler, hedef göz önünde bulundurularak, birbirlerine karşı önem derecelerine göre ikili karşılaştırmaya tabi tutulur. Üçüncü aşamada ise bütün alternatifler için, her bir kriter üzerinden ikili karşılaştırmalar yapılarak önem yüzde dağılımları elde edilir (Pala, 2013).



Şekil 4: AHY hiyerarşik yapısı (Pala, 2013)

AHY'de ölçeğin belirlenmesi çok önemlidir. Standart ölçekler para birimi, uzunluk birimi veya ısı derecesi gibi birimlerle oluşur. Bu ölçekler belli bir özelliği ölçmek için geliştirilen birimlerle nesnelere ya da olayların ölçülmesine yarar. Ölçekteki sayılar insan zihninde uyarıcı bir işlev görmesine rağmen kendi başlarına bir değeri yoktur. Bu tür ölçekleri kullanmayan, görel ölçüm yöntemi adını taşıyan daha genel bir ölçüm yöntemi de vardır. Görel ölçüm yöntemi, soyut, maddi olmayan özellikleri (sevgi, doğruluk vb.) ölçmek için de kullanılabilir. Diğer bir önemli özelliği ise gerekli hallerde standart ölçekten elde edilebilen bilgileri de kullanabilmesidir. Böyle bir durumda standart oran ölçeğinden elde edilen ölçümler normal hale getirilerek görel ölçekteki ölçümlere dönüştürülebilir. Eğer ele alınan özelliklerle ilgili önceliğin ya da önem derecesinin ifade edilmesi gerekirse görel ölçüme ihtiyaç vardır. Görel ölçük bu durumda, standart ölçükle ifade edilen verilerin gerçekte neyi yansıttığını anlamak için büyük bir yardımcıdır ve birçok durumda ihtiyaç duyulmaktadır (Saaty, 1990; Saat, 2000).

Saaty (1994) tarafından AHY için kullanılmak üzere görel bir puanlandırma ölçeği geliştirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Analitik hiyerarşi yöntemi puanlandırma ölçeği (Saaty, 1994)

Temel Ölçek (Satır ve Sütun)	Eşit Önem	Ara Değer	Orta Derecede Daha Önemli	Ara Değer	Güçlü Derecede Daha Önemli	Ara Değer	Çok Güçlü Derecede Daha Önemli	Ara Değer	Son Derece Daha Önemli
Değerler	1	2	3	4	5	6	7	8	9

AHY adımları (Pala, 2013; Yaralıoğlu, 2004) aşağıdaki şekilde verilebilir:

Adım 1: Karar verme probleminin tanımlanmasıdır. Karar verme probleminin tanımlanması iki aşamadan oluşur. Birinci aşama, karar probleminde, aralarından seçim yapılması gereken alternatiflerin belirlenmesi işlemidir. Alternatifler bu çalışma için, piksellere ayrılmış bütün Kocaeli ilidir. İkinci aşama ise seçimi yaparken etkisi bulunan kriterlerin belirlenmesidir. Kriterlerin açık ve detaylı tanımlanmalarının yapılması, problemin en doğru ve güvenilir çözüme ulaşması açısından çok önemlidir. Alternatiflerin sayısı m, kriterlerinki ise n olarak kabul edilmiştir. Kriter sayısı (n) bu çalışma için 13'tür.

Adım 2: Kriterler arası karşılaştırma matrisinin elde edilmesidir. Kriterler arası karşılaştırma matrisi, n x n boyutlu, aynı sırada satır ve sütunlara yazılan kriterlerin birbirleriyle ikili karşılaştırılmalarından oluşan bir kare matristir. Kare matrisin köşegen noktaları, aynı kriterler aynı önem derecesine sahip olduğundan dolayı 1 değerini alır. A karşılaştırma matrisinin elemanları kriterler arası ikili karşılaştırmaların sonuçlarını vermektedir. Kriterlerin ikili karşılaştırılmalarında AHY puanlandırma ölçeği (Tablo 2) kullanılır. Örnek olarak birinci kriter, ikinci kritere göre güçlü derecede daha önemli ise, A matrisinin a_{12} bileşeni 5 değerini alacaktır. Tam tersi durumda yani ikinci kriter, birinci kritere göre güçlü derecede daha önemli olursa, bu kez aynı matris elemanı olan a_{21} , 1/5 değerini alacaktır (Tablo 3).

Tablo 3: A karşılaştırma matrisi

Faktörler	Rüzgâr Hızı	Korunan Alanlara Uzakhk	Kuş Göç Yollarına Uzakhk	Trafo Merkezlerine Uzakhk	Enerji Nakil Hatlarına Uzakhk	Yerleşim Alanlarına Uzakhk	Karayollarına Uzakhk	Fay Hatlarına Uzakhk	Yükseklik	Eğim	Akarsulara Uzakhk	Göllere Uzakhk	Havaalanına Uzakhk
Rüzgâr Hızı	1	1	1	3	3	3	5	5	7	7	9	9	9
Korunan Alanlara Uzakhk	1	1	1	3	3	3	5	5	7	7	9	9	9
Kuş Göç Yollarına Uzakhk	1	1	1	3	3	3	5	5	7	7	9	9	9
Trafo Merkezlerine Uzakhk	1/3	1/3	1/3	1	1	1	3	3	5	5	7	7	7
Enerji Nakil Hatlarına Uzakhk	1/3	1/3	1/3	1	1	1	3	3	5	5	7	7	7
Yerleşim Alanlarına Uzakhk	1/3	1/3	1/3	1	1	1	3	3	5	5	7	7	7
Karayollarına Uzakhk	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1	3	3	5	5	5
Fay Hatlarına Uzakhk	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	1	3	3	5	5	5
Yükseklik	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1	3	3	3
Eğim	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1	3	3	3
Akarsulara Uzakhk	1/9	1/9	1/9	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Göllere Uzakhk	1/9	1/9	1/9	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Havaalanına Uzakhk	1/9	1/9	1/9	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Sütun Toplamları	5.02	5.02	5.02	13.50	13.50	13.50	27.27	27.27	45.00	45.00	67.00	67.00	67.00

Adım 3: Kriterlerin yüzde önem dağılımlarının elde edilmesidir. Kriterlerin normalize edilmiş ikili karşılaştırmalar matrisinin elemanları, **A** karşılaştırma matrisindeki her elemanın, ait olduğu sütunun toplamına bölünmesiyle elde edilir (Tablo 4).

Tablo 4: Normalizasyon matrisi

1	0.1992	0.1992	0.1992	0.2223	0.2223	0.2223	0.1834	0.1834	0.1556	0.1556	0.1343	0.1343	0.1343
2	0.1992	0.1992	0.1992	0.2223	0.2223	0.2223	0.1834	0.1834	0.1556	0.1556	0.1343	0.1343	0.1343
3	0.1992	0.1992	0.1992	0.2223	0.2223	0.2223	0.1834	0.1834	0.1556	0.1556	0.1343	0.1343	0.1343
4	0.0664	0.0664	0.0664	0.0741	0.0741	0.0741	0.1100	0.1100	0.1111	0.1111	0.1045	0.1045	0.1045
5	0.0664	0.0664	0.0664	0.0741	0.0741	0.0741	0.1100	0.1100	0.1111	0.1111	0.1045	0.1045	0.1045
6	0.0664	0.0664	0.0664	0.0741	0.0741	0.0741	0.1100	0.1100	0.1111	0.1111	0.1045	0.1045	0.1045
7	0.0398	0.0398	0.0398	0.0247	0.0247	0.0247	0.0367	0.0367	0.0667	0.0667	0.0746	0.0746	0.0746
8	0.0398	0.0398	0.0398	0.0247	0.0247	0.0247	0.0367	0.0367	0.0667	0.0667	0.0746	0.0746	0.0746
9	0.0285	0.0285	0.0285	0.0148	0.0148	0.0148	0.0122	0.0122	0.0222	0.0222	0.0448	0.0448	0.0448
10	0.0285	0.0285	0.0285	0.0148	0.0148	0.0148	0.0122	0.0122	0.0222	0.0222	0.0448	0.0448	0.0448
11	0.0221	0.0221	0.0221	0.0106	0.0106	0.0106	0.0073	0.0073	0.0074	0.0074	0.0149	0.0149	0.0149
12	0.0221	0.0221	0.0221	0.0106	0.0106	0.0106	0.0073	0.0073	0.0074	0.0074	0.0149	0.0149	0.0149
13	0.0221	0.0221	0.0221	0.0106	0.0106	0.0106	0.0073	0.0073	0.0074	0.0074	0.0149	0.0149	0.0149

Öncelik vektörü (**W**), normalizasyon matrisinin her bir satır toplamının, kullanılan faktör sayısına (13) bölünmesiyle elde edilir (Tablo 5). Yapılacak tutarlılık kontrolü sonrasında istenilen tutarlılığa ulaşıldığı zaman, faktörlerin ağırlıkları bu değerler olmuş olur.

Tablo 5: W öncelik vektörü

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.180	0.180	0.180	0.091	0.091	0.091	0.048	0.048	0.026	0.026	0.013	0.013	0.013

Adım 4: Kriterlerin karşılaştırılmasındaki tutarlılık ölçülür. Yöntem tutarlılık kontrolü için bir süreç içermektedir. Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio, CR), kriterler arasında yapılan ikili karşılaştırmaların ne derece tutarlı olduğunu görebilmek için hesaplanır. CR'nin hesaplanabilmesi için ilk önce Temel Değer (λ) katsayısını belirlemek gerekmektedir. λ katsayısını elde edebilmek için ise **A** karşılaştırma matrisi ile **W** öncelik vektörünü, matris çarpımı işlemine sokarak, aşağıda gösterilen **D** sütun vektörü bulunmalıdır (Tablo 6).

Tablo 6: D sütun vektörü

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2.553	2.553	2.553	1.275	1.275	1.275	0.648	0.648	0.334	0.334	0.175	0.175	0.175

D sütun vektörünün her elemanı, **W** öncelik vektöründe karşılık gelen elemene bölünür. Bulunan bu değerler toplanarak aritmetik ortalaması alınır. Bir başka ifadeyle, bulunan değerlerin toplamı faktör sayısına (13) bölünür. Sonuçta çıkan değer, λ katsayısı olmuş olur (λ katsayısı: 13.64193705). λ katsayısı hesaplandıktan sonra Tutarlılık Göstergesi (Consistency Index, CI) aşağıdaki gibi bulunur:

$$CI = (\lambda - \text{faktör sayısı (13)}) / (\text{faktör sayısı (13)} - 1) = 0.053494755 \quad (1)$$

CR değeri, CI değerinin Random Gösterge (Random Index, RI) olarak ifade edilen standart düzeltme değerine bölünmesiyle 0.034291509 olarak elde edilir. Çalışmada kullanılan faktör sayısı 13 olduğundan, RI değeri olarak (Tablo 7), 1.56 sayısı

kullanılmıştır.

Tablo 7: RI değerleri (Harker, 1989)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Eğer bulunan CR değeri 0.10'dan küçük ise karar veren kişinin yaptığı ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğu kabul edilir. Eğer CR değeri 0.10'dan büyük ise karar veren kişinin yaptığı ikili karşılaştırmalar tutarsızdır ve bunları tekrar gözden geçirmelidir. Bulunan CR değeri 0.10'dan küçük olduğundan yapılan ikili karşılaştırmalar tutarlıdır. Yani **W** öncelik vektöründe çıkan değerler, belirlenen faktörlerin ağırlıkları olarak kullanılabilir. Faktörlerin ağırlıkları, ayrıca yüzdesel olarak Tablo 8'de belirtilmektedir.

Adım 5: Her bir kriter için, m adet alternatifin yüzde önem dağılımlarının elde edilmesi işlemidir. AHY bu adımda her bir kriter için ayrı tablo oluşturmak suretiyle alternatifleri ikili karşılaştırmalara tabi tutar. Bu aşamadaki işlemler 2. ve 3. adımlarda anlatılan şekilde ilerler. Alternatiflerin sayısını m olarak kabul ettiğimiz için n adet m x m boyutunda **G** karşılaştırma matrisi oluşturulur. Alternatifler arası ikili karşılaştırmalar yapılırken yine AHY puanlandırma ölçeği kullanılır. Her **G** karşılaştırma matrisi için, alternatiflerin kriterlere göre yüzde önem değerlerini gösteren m x 1 boyutlu **S** sütun vektörleri (öncelik vektörleri) elde edilir.

Adım 6: Alternatiflerin sonuç dağılımının bulunmasıdır. Son aşama olan alternatiflerin sonuç dağılımlarının yani ağırlıklarının bulunması için ilk önce n adet **S** sütun vektöründen oluşan m x n boyutlu karar matrisi (**K**) elde edilir. **K** matrisinin, kriterlerin ağırlığını belirten **W** öncelik vektörü ile çarpımı sonucu **L** sütun vektörü elde edilir. **L** sütun vektörü m x 1 boyutlu olup, m adet alternatifin hedef açısından yüzde dağılımını verir. Bu dağılım karar probleminde alternatiflerin önem sıralamalarını yani sonuç ağırlıklarını gösterir.

Çalışmada, AHY'nin ilk 4 adımı uygulanmıştır. Problemi çözmek için kullanılan faktörlerin (kriterlerin), önem derecelerine göre karşılaştırılmaları yapılarak, problemin çözümüne giden yoldaki ağırlıkları belirlenmiştir. AHY'de belirtilen alternatifler bu çalışma için bütün Kocaeli ilidir. Ağırlıklı çakıştırma için bütün faktör haritaları sınıflandırılmalarıyla beraber raster formatına çevrildiğinden dolayı, raster hücrelerine bölünen Kocaeli ili, problemin alternatiflerini oluşturmaktadır. Yani her bir raster hücresi bir alternatifi belirtmektedir. AHY'nin 5. ve 6. adımını, faktör ağırlıkları belirlenip, ağırlıklı çakıştırma işlemi başlatıldıktan sonra CBS yazılım programı yapmaktadır. Uygunluk derecesine göre alternatifleri, yani hücrelere ayrılmış Kocaeli ilini, her hücre için sonuç uygunluğunu belirtir şekilde sunmaktadır.

5. Bulgular

RES kurulamayacak alanlar (Tablo 1) belirlendikten sonra, kullanılan faktörleri uygunluk sınıflarına bölme işlemine geçilmiştir. Faktörlerin, Aitzhanov (2016), Aydin vd. (2009), Bennui vd. (2007), Şimşek (2020), Urfalı ve Eymen (2021) çalışmalarından yola çıkılarak 6 sınıfa bölünmesi planlanmıştır. 0 puan (Uygun Değil) – 5 puan (Son Derece Uygun) aralığında sınıflandırılmaları yapılmıştır. Bu aşamada da yine çoğu faktörde, geçmişte yapılan çalışmalara benzer aralıklarda bölümlendirmeler yapılmasına dikkat edilmiştir.

Tablo 8: Faktörlerin uygunluk sınıfları, öncelik sıraları ve sonuç ağırlık yüzdeleri

Faktörler	Uygunluk Sınıfları ve Değerleri						Kaynak	AHY Öncelik Sırası	AHY Ağırlık (%)
	Son Derece Uygun (5)	Çok Uygun (4)	Uygun (3)	Orta Derece Uygun (2)	Az Uygun (1)	Uygun Değil (0)			
Rüzgar Hızı (m/s)	6.40 - 6.70	6.05 - 6.40	5.70 - 6.05	5.35 - 5.70	5 - 5.35	2.23 - 5	-	1	18.0
Korunan Alanlara Uzaklık (m)	> 4000	3500 - 4000	3000 - 3500	2500 - 3000	2000 - 2500	0 - 2000	(Bennui vd., 2007)	1	18.0
Kuş Göç Yollarına Uzaklık (m)	> 2500	2000 - 2500	1500 - 2000	1000 - 1500	500 - 1000	0 - 500	(Aitghanov, 2016)	1	18.0
Trafo Merkezlerine Uzaklık (m)	< 1000	1000 - 5000	5000 - 10000	10000 - 15000	15000 - 25000	> 25000	(Özşahin & Kaymaz, 2013; Urfalı & Eymen, 2021)	2	9.1
Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık (m)	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2500	2500 - 5000	5000 - 10000	< 100 ve >10000	(Urfalı & Eymen, 2021)	2	9.1
Yerleşim Alanlarına Uzaklık (m)	> 4000	3500 - 4000	3000 - 3500	2500 - 3000	2000 - 2500	< 2000	(Urfalı & Eymen, 2021)	2	9.1
Karayollarına Uzaklık (m)	100 - 1000	1000 - 2000	2000 - 3000	3000 - 4000	4000 - 10000	< 100 ve >10000	(Baban & Parry, 2000)	3	4.8
Fay Hatlarına Uzaklık (m)	> 5000	4000 - 5000	3000 - 4000	2000 - 3000	1000 - 2000	< 1000	(Artun, 2020)	3	4.8
Yükseklik (m)	750 - 1500	450 - 750	300 - 450	150 - 300	0 - 150	> 1500	(Özşahin & Kaymaz, 2013; Urfalı & Eymen, 2021)	4	2.6
Eğim (%)	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30	> 30	(Urfalı & Eymen, 2021)	4	2.6
Akarsulara Uzaklık (m)	> 15000	12000 - 15000	9000 - 12000	6000 - 9000	3000 - 6000	< 3000	(Aitghanov, 2016)	5	1.3
Göllere Uzaklık (m)	> 15000	12000 - 15000	9000 - 12000	6000 - 9000	3000 - 6000	< 3000	(Aitghanov, 2016)	5	1.3
Havaalanına Uzaklık (m)	> 15000	12000 - 15000	9000 - 12000	6000 - 9000	3000 - 6000	< 3000	(Bennui vd., 2007)	5	1.3

Belirli bir alandaki ortalama rüzgâr hızı, ekonomik RES yatırımı için oldukça önemlidir. Hemen her çalışmada rüzgâr hızı faktörü ya direkt olarak kullanılır ya da rüzgâr hızı verisinden üretilen, kapasite faktörü veya güç yoğunluğu verilerine dönüştürülerek kullanılır. Rüzgâr hızı verisinin elde edilebilmesi için, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün hazırlamış olduğu REPA'da bulunan, Kocaeli ili 100 metre yükseklikteki yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılım haritası (Şekil 3) resim formatında kaydedilip, CBS yazılım programı ortamına aktarıldıktan sonra, "georeferencing" işlemi ile, CBS yazılım programı üzerinde bulunan Kocaeli il haritası üzerine oturtulmuştur. Daha sonra resim üzerine yaklaşık 95 000 nokta atılmıştır ve REPA'nın lejantına göre noktalara rüzgâr hızı değerleri el ile girilmiştir. Bu işlem tamamlandıktan hemen sonra Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (Inverse Distance Weighting, IDW) aracı yardımıyla, noktalara girilen rüzgâr hızı değerleri kullanılarak 100 metre yükseklikteki rüzgâr hızı haritası elde edilmeye çalışılmıştır. RES yatırımı için uygun olmayan rüzgâr hızı pek çok çalışma için farklılık göstermektedir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) ile yapılan görüşmeler sonucu, 100 metrede 2.5-3 m/sn rüzgâr hızı RES sistemini çalıştırmaya yetecek bir rüzgâr rejimi olmasına rağmen, ekonomik RES yatırımı için rüzgâr hızının 5-6 m/sn değerlerinden başlayan bir rüzgâr rejimi olması gerektiği öğrenilmiştir. Ayrıca Baban ve Parry (2000) ve Özşahin ve Kaymaz (2013) çalışmaları da bu bilgiyi destekler niteliktedir. REPA'da bulunan bilgiye göre Kocaeli'nde en yüksek ortalama rüzgâr hızı 100 metrede 6.70 m/s olduğundan, 5-6.7 m/s arası 5 parçaya bölünerek sınıflandırılmış ve son derece uygun sınıfta 0.30 m/s, diğer sınıflarda 0.35 m/s artış yapılmıştır. Ayrıca yine REPA'da bulunan bilgiye göre Kocaeli'nde 100 metrede en düşük rüzgâr hızı 2.23 m/s'dir. En yüksek rüzgâr hızı daha yüksek olan illerde daha farklı sınıflandırma yapılması mümkündür.

Korunan alanlara uzaklık faktörü birçok çalışmada parametre olarak alınmıştır. Korunan alanlar, T.C. Tarım ve Orman

Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü (URL-8) internet sitesinden kontrol edilmiş ve Kocaeli’nde korunan alan olarak 8 tane tabiat parkı olduğu öğrenilerek haritası hazırlanmıştır. Korunan alanlara uzaklık faktörü doğal alanların zarar görmemesi veya yok olmaması, yaban hayatının zarar görmemesi, insanların bu tür alanlara her zaman ihtiyacı olduğu gerçeği vb. gibi nedenlerle çok önemlidir.

Rüzgâr türbinlerinin dönen kanatlarının kuşların gözünde bulanıklığa sebep olması sebebiyle türbinlere çarpma ihtimalleri oluşmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla RES’ler kuş göç yollarından belli bir uzaklığa inşa edilmelidir (Aydin vd., 2009). Ayrıca Kocaeli Karamürsel’de yapılması planlanan RES’in iptal sebeplerinden biri de mahkemenin görevlendirdiği bilirkişinin raporuna göre, kısmen kuş göç yolları üzerinde bulunmasıdır (URL-9). Bu nedenle kuş göç yollarına uzaklık faktörünün, ülkemiz için çok önemli bir kriter olduğu görülmektedir.

Trafo merkezleri enerjinin dönüştürülmesini sağlamaktadır. Enerji iletilirken kayıplar göz önüne alındığında trafo merkezlerine yakınlık önemli bir faktör haline gelmektedir (Urfalı & Eymen, 2021). Trafo merkezlerine uzaklık haritası hazırlanırken dağıtım merkezi olan trafolar değil, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi’nin (TEİAŞ) mülkiyetinde olan ana trafo merkezleri göz önünde bulundurulmuştur.

Enerji nakil hatlarına uzaklık faktörüne birçok çalışmada önem verilmiş ve kullanılmıştır. RES’in pervane yarıçapıyla ilgili olarak enerji nakil hattıyla arasında bir mesafe olmalıdır. Genel olarak rüzgâr türbinlerinin pervane yarıçapı 100 metreyi geçmediğinden, 100 metre mesafe bırakılması doğru bir yaklaşım olacaktır (Sunak vd., 2015). Maliyet açısından ise, iletim hattına 10.000 metreden daha fazla uzaklık olması uygun olmayacaktır (Baban & Parry, 2000). Enerji nakil hattına yakınlık, üretilen enerjinin hızlı ve az kayıpla aktarılabilmesi ve iletim hattına bağlanma maliyetini düşürmesi açısından önemlidir (Sunak vd., 2015). RES’lerin, Kocaeli’nin bağlı olduğu TEİAŞ 5. Genel Müdürlüğünden edinilen bilgiye göre, 34.5-180 kW arası orta gerilim hatlarına bağlanmasına onay verildiği öğrenilmiş ve bu hatlar kullanılmıştır.

Yerleşim alanlarına uzaklık faktörü, literatür taramaları kapsamında incelenen bütün çalışmalarda yer almaktadır. Yerleşim alanlarına uzaklık faktörü genel olarak sosyal kabulle ilgili bir durumdur. Rüzgâr türbinlerinin, gürültü, görsel ve peyzaj, gölge titreşimi veya ışık yansımaları gibi etkilerinden dolayı yerleşim alanlarından uzakta konumlandırılmaları önemlidir (Sunak vd., 2015).

Karayollarına uzaklık faktörü ekonomik açıdan önemli olduğundan çoğu çalışmada değerlendirilmiştir. RES’lere rahat ve masrafsız ulaşım imkanlarının bulunduğu alanlar öncelikle tercih edilen yerlerdir. Çünkü rahat ve kolay ulaşım imkânı yoksa firmalar yol açtırmak zorundadır (Özşahin & Kaymaz, 2013). Bununla birlikte görsel müdahaleyi azaltmak için karayollarından güvenli bir mesafede yerleştirilmelidir (Baban & Parry, 2000).

Aktif fay hatlarına yakınlık arttıkça deprem etkisi de artacağından, fay hatlarına uzaklık kriteri önemli hale gelmektedir (Arca & Çıtıroğlu, 2020). Aktif fay hatları, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü’nün (MTA) internet sitesinde bulunan, yerbilimleri harita görüntüleyici ve çizim editörü (URL-6) üzerinden belirlenerek sayısallaştırılmıştır.

Yükseklik faktörü bazı çalışmalarda değerlendirmeye alınmıştır. Yükseklik haritası, sayısal yükseklik modeli (Digital Elevation Model, DEM) verisi olarak tanımlanmaktadır. USGS (United States Geological Survey) Earth Explorer (URL-7) sitesinden Mekik RADAR Topoğrafya Görevi (Shuttle RADAR Topography Mission, SRTM) yöntemiyle elde edilen DEM verisi, 1 ark-saniye (30 metre) çözünürlükte indirilmiştir. Rüzgâr hızı yükseltiye göre artma veya azalma eğilimi göstermektedir. Pratik olarak rüzgâr hızının her 150 metrede bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu yüzden yükselti faktörü de önem kazanmaktadır (Özşahin & Kaymaz, 2013).

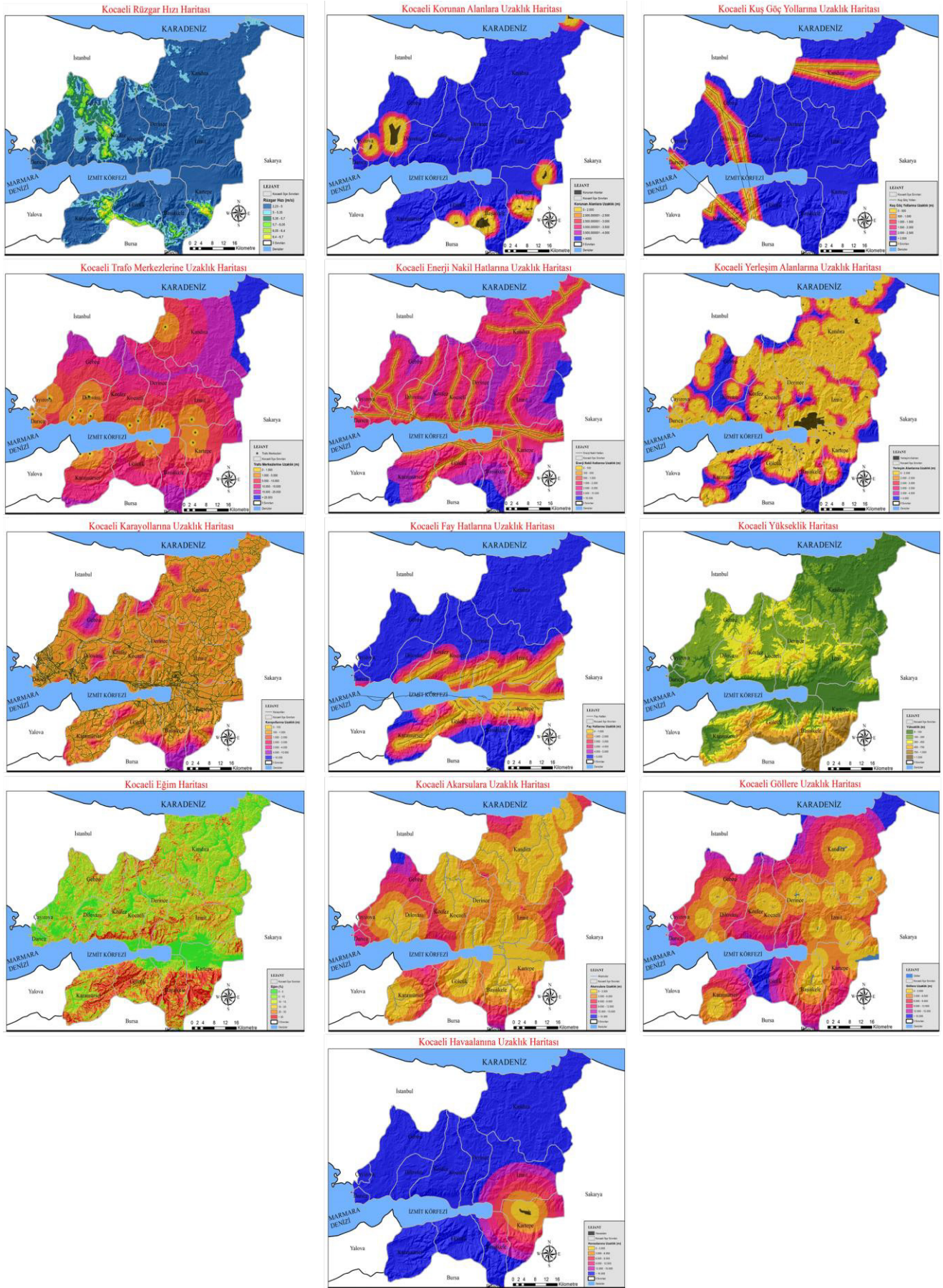
Arazinin eğimi inşaat maliyetini etkileyebilecek bir faktördür (Atıcı vd., 2015). Bir yüzeyin dik eğimi vinçlerin ve kamyonların erişebilirliğini azaltır (Sunak vd., 2015). Rüzgâr türbinleri çok büyük yapılar olduğundan dolayı bunların taşınması ve kurulması çok zordur (Şimşek, 2020). Bu gibi sebeplerden ötürü eğim faktörü önem kazanmaktadır. Eğim haritası, yükseklik haritası kullanılarak yüzdelik olarak elde edilmiştir.

Akarsulara uzaklık faktörü çoğu çalışmada değerlendirilmektedir. Bazı çalışmalarda sadece akarsular kullanılırken, bazılarında ise akarsular ve göller, yüzey suları olarak bir bütün halinde değerlendirmeye alınmıştır. Akarsulara yakın alanlar yoğun arazi kullanımı, tarımsal faaliyet, bitki örtüsü ve yerleşim alanı olma gibi özelliklerinden dolayı rüzgâr türbini için uygun değildir (Arca & Çıtıroğlu, 2020). Doğal alanları korumak önemli olduğundan bu faktör de değerlendirmeye alınması gereken bir kriter haline gelmektedir.

Akarsulara uzaklık kısmında bahsedildiği gibi, göllerin de kriterlere dahil edildiği bazı çalışmalarda akarsular ve göller beraber şekilde değerlendirilirken, göllere uzaklık faktörünün ayrıca değerlendirildiği Can ve Yücel (2019) çalışması, bu projede örnek alınmıştır. Göllere uzaklık faktörünün daha net belli olması ve veri türünün akarsulardan farklı olması nedeniyle bu yöntem tercih edilmiştir. Akarsular gibi gölleri de korumak ve yok olmalarını engellemek, kuraklığın giderek arttığı günümüz dünyasında çok önemlidir.

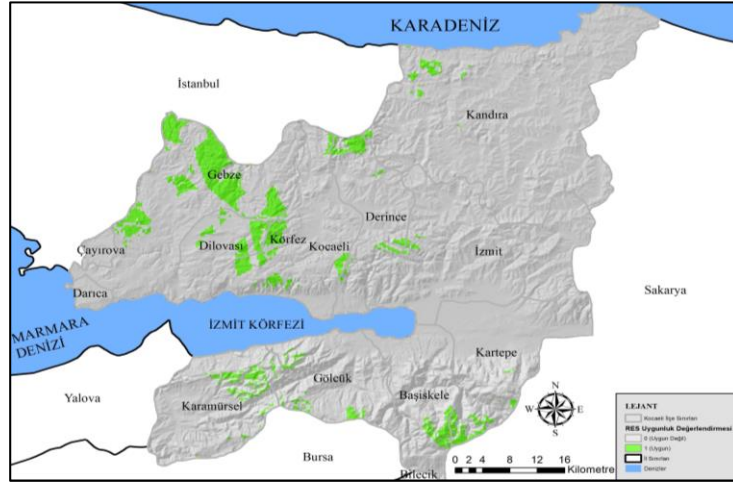
Havaalanına uzaklık faktörü bazı çalışmalarda kullanılmış ve uygun olmayan sınıfı için farklı değerlendirmeler yapılmıştır. 5431 sayılı kanununun 11. maddesi gereği, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan havaalanları çevresindeki yapılaşma kriterleri konulu belgeye göre (URL-10), havaalanı çevresinden itibaren 15000 metre boyunca devam eden yaklaşma ve kalkış-tırmanış yüzeyleri boyunca, havaalanlarından itibaren ilk 3000 metre içinde, insanların toplu halde bulunduğu hastane, otogar gibi yapılara ve uçuş güvenliğini tehlikeye düşürecek yükseklikte yapılara izin verilmemektedir. RES'ler yüksek yapılar olduğundan, uçuş güvenliği için ilk 3000 metre içinde yapımına onay verilmesi pek mümkün görülmemektedir. 3000 metreden sonraki kısımlar için Sivil Havacılık Genel Müdürlüğünden görüş alınmalıdır.

Faktörlerin, Tablo 8'de verildiği şekilde uygunluk sınıflarına ayrılmış haritaları Şekil 5'te görülmektedir.



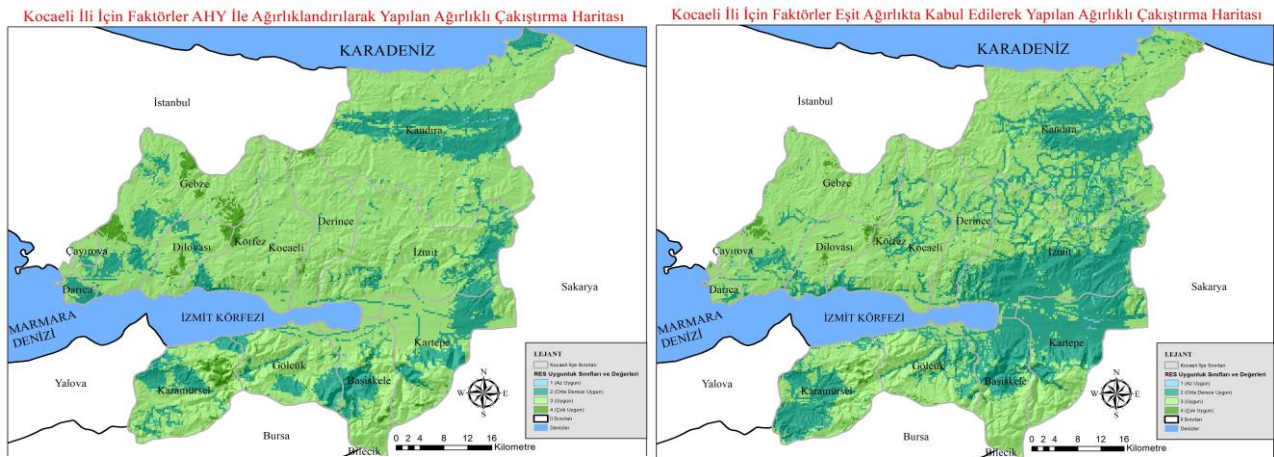
Şekil 5: Faktörlerin uygunluk sınıflarına ayrılmış haritaları

RES kurulumu için belirlenen faktörlerin her biri ayrı ayrı incelendiğinde, faktörlerin uygun olmayan sınıflarında kalan alanların sonuç haritalarında bulunmaması gerektiği düşünülmüştür. Bu nedenle bir maskeleme haritası oluşturulmuştur (Şekil 6). Maskeleme haritası oluşturmak için öncelikle, faktörler uygunluk sınıfları tablosuna (Tablo 8) bağlı olarak, 1 (1, 2, 3, 4, 5 puanlılar dahil olmak üzere tüm uygun olan alanlar) ve 0 (uygun olmayan alanlar (sadece 0 puan)) olmak üzere iki sınıfa bölünmüştür. Sonra veriler üst üste çakıştırılarak, Kocaeli ili için RES kurulabilir alanlar ve kurulamayacak alanlar olmak üzere harita üzerinde gösterilmiştir. Bu yöntem, bir faktör için bile, herhangi bir alan uygun olmayan sınıflında kalıyorsa, o alanı uygun olmayan sınıfa atayacaktır ve RES için uygun olmayan alanlar doğru bir şekilde belirlenebilecektir. Kocaeli ili RES uygunluk değerlendirme haritası Şekil 6 üzerinden incelenebilir.

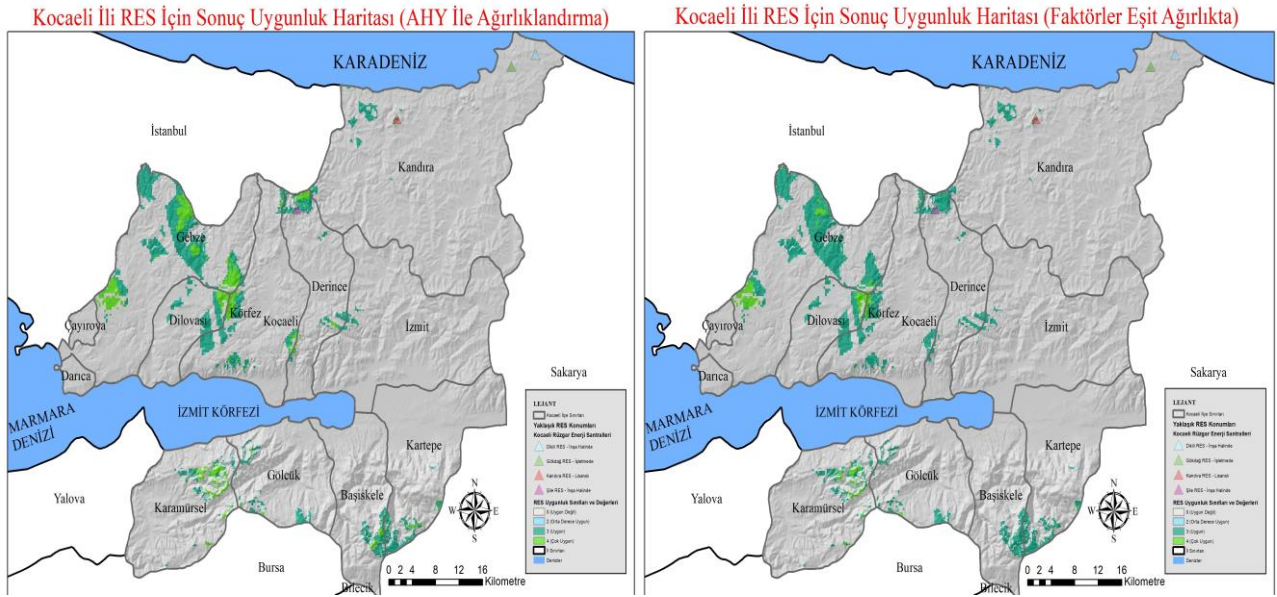


Şekil 6: Kocaeli ili RES için maske alanı haritası

Çalışmadaki faktörlerin birbirlerine göre ağırlıkları 2 farklı yöntem ile belirlenmiştir. İlk olarak faktörler AHY ile ağırlıklandırılmıştır. Buna göre Tablo 3'te faktörler birbirleri ile karşılaştırılarak, ara işlemler sonrasında Tablo 5'te belirtilen ağırlık vektörleri belirlenmiştir. Bu ağırlık vektörleri kullanılarak faktörler çakıştırma işlemine sokulmuş ve Şekil 7'deki (sol) harita oluşturulmuştur. İkinci bir yöntem olarak faktör haritaları eşit olarak ağırlıklandırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen çakıştırma haritası Şekil 7 (sağ) üzerinden incelenebilir. Son olarak, RES için uygun olan alanların (Şekil 6), ne derece uygun olduğunun belirlenebilmesi için, iki yönteme göre elde edilen haritalar maske alanı haritası ile örtüştürülerek sonuç uygunluk haritaları elde edilmiştir (Şekil 8).

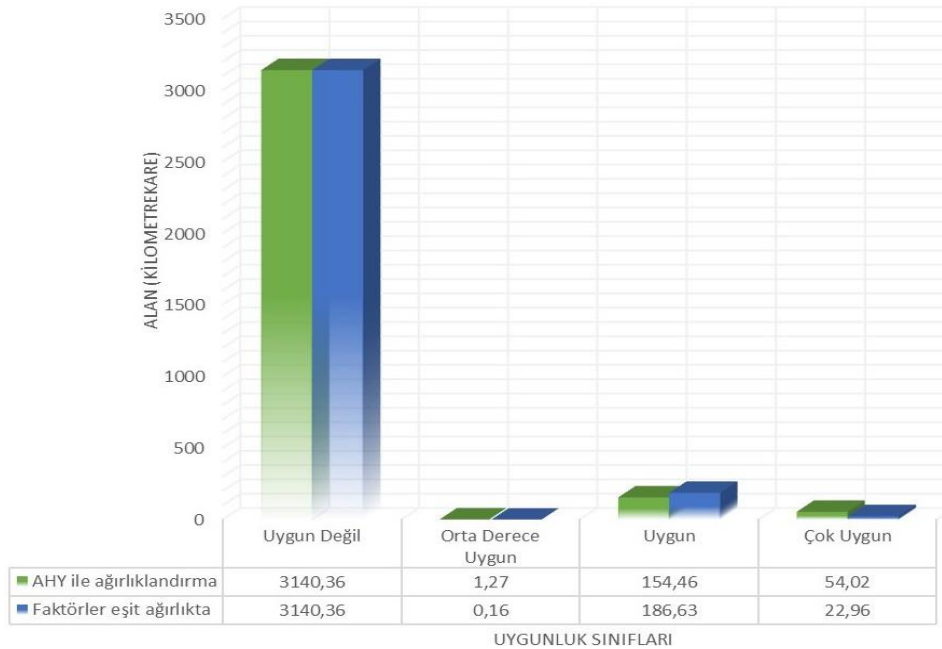


Şekil 7: (sol) Kocaeli ili için faktörler AHY ile ağırlıklandırılarak yapılan ağırlıklı çakıştırma haritası, (sağ) Kocaeli ili için faktörler eşit ağırlıkta kabul edilerek yapılan ağırlıklı çakıştırma haritası



Şekil 8: (sol) Kocaeli ili RES için sonuç uygunluk haritası (AHY ile ağırlıklandırma), (sağ) Kocaeli ili RES için sonuç uygunluk haritası (faktörler eşit ağırlıkta)

RES için sonuç uygunluk haritaları bulunduktan sonra, uygunluk sınıfları için kilometrekare (km²) cinsinden alan çıkarımları yapılmıştır. AHY ile elde edilen sonuç uygunluk haritasının, uygunluk sınıflarına göre alan dağılımları ve faktörler eşit ağırlıkta kabul edilerek elde edilen sonuç uygunluk haritasının, uygunluk sınıflarına göre alan dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 9: Kocaeli ili RES için sonuç uygunluk alanlarının, faktörlerin AHY ile ağırlıklandırılması ve faktörlere eşit ağırlık verilmesi sonuçlarına göre karşılaştırılması

Uygunluk sınıfları alanlarının, her iki yöntemle bulunan sonuçlar için, ilçeler bazında dağılımı ise Tablo 9 üzerinden incelenebilir.

Tablo 9: Kocaeli ili ilçeler bazında RES uygunluk sınıfları alanları

İlçeler	RES İçin Uygunluk Sınıfları Alanları (km ²)							
	AHY İle Ağırlıklandırma				Faktörler Eşit Ağırlıkta			
	Çok Uygun (4)	Uygun (3)	Orta Derecede Uygun (2)	Uygun Değil (0)	Çok Uygun (4)	Uygun (3)	Orta Derecede Uygun (2)	Uygun Değil (0)
Başiskele	1.72	9.03	0.06	194.31	0.02	10.80	-	194.31
Çayırova	-	-	-	21.86	-	-	-	21.86
Darıca	-	-	-	21.85	-	-	-	21.85
Derince	3.69	11.72	-	181.27	0.25	15.21	-	181.27
Dilovası	3.82	13.67	0.20	107.13	3.68	13.89	-	107.13
Gebze	27.18	60.78	0.12	324.83	10.95	76.94	-	324.83
Gölcük	0.68	7.40	0.21	204.43	0.52	7.94	-	204.43
İzmit	-	2.48	-	475.28	-	2.48	-	475.28
Kandıra	0.23	8.73	0.05	818.66	0.05	8.88	-	818.66
Karamürsel	8.33	6.31	0.24	240.91	4.74	10.05	-	240.91
Kartepe	1.42	11.49	0.18	285.08	0.29	12.81	0.16	285.08
Körfez	6.95	22.85	0.21	264.75	2.46	27.63	-	264.75
Toplam:	54.02	154.46	1.27	3140.36	22.96	186.63	0.16	3140.36

6. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, dünya üzerinde her geçen gün artan enerji ihtiyacına karşı, başta ülkemiz ve tüm dünya ülkeleri tarafından önem verilen ve gelecek planlamalarında fazlaca yer alan, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisi konusu ele alınmıştır. İlk olarak RES yer seçimini etkileyen faktörler tespit edilmiş ve ilgili faktör verileri çeşitli şekillerde elde edilmiştir. Elde edilen veriler ile gerekli analizlerin yapılabilmesi için CBS kullanılmıştır. Geçmişte yapılan çalışmalar dikkatle taranarak faktör haritaları uygunluk sınıflarına bölünmüştür. Uygunluk sınıflarına bölünen faktör haritaları ile, program üzerindeki çeşitli araçlar kullanılarak Kocaeli ili için RES uygunluk durumu haritası (maske alanı haritası) elde edilmiştir. Sonuç incelendiğinde, Kocaeli ilinin %93.739'lük (3140.36 km²) alanı RES için uygun olmayan, %6.261'lik (209.75 km²) alanı ise RES için uygun olan alan olarak çıkmıştır. Uygun alanlar ilçe bazında incelendiğinde, Gebze ilçesinin kuzey ve batı kısımlarında bazı alanlar, Gebze, Dilovası ve Körfez ilçelerinin sınırlarının birleştiği kısımdaki alan ve çevresi, Körfez ilçesinin güney, güneydoğu ve güneybatı kısımlarında bazı alanlar, Derince ilçesinin kuzey, güneydoğu ve güneybatı kısımlarındaki bazı alanlar, Kandıra ilçesinin kuzeybatı kısmında bazı alanlar, Başiskele ve Kartepe ilçesinin güneyde sınırlarının birleştiği kısımdaki alan ve çevresi, Karamürsel ilçesinin kuzeydoğu kısmında bazı alanlar, Gölcük ilçesinin kuzeybatı, güneybatı ve güneydoğu kısmında bulunan bazı alanlar, İzmit ilçesinin batı tarafında ufak bir alan RES için uygun alanlar olarak görülmektedir. Çayırova ve Darıca ilçelerinde, RES için hiç uygun alan bulunmamaktadır.

Uygun olan alanların, uygunluk derecelerine göre sınıflandırılabilmesi için, ağırlıklı çakıştırma işlemi yapılmıştır. Bu aşamada ilk olarak, faktörleri birbirlerine karşı önceliklerine göre sıralayıp, çeşitli işlemlerden sonra ağırlıklarını belirleme yöntemi olan AHY kullanılarak elde edilen sonuçlara göre, %93.739'lük (3140.36 km²) alanı RES için uygun olmayan (0 puan), %0.038'lik (1.27 km²) alanı orta derecede uygun (2 puan), %4.611'lik (154.46 km²) alanı uygun (3 puan), %1.612'lik (54.02 km²) alanı çok uygun (4 puan) sınıfında çıkmıştır. Faktörler eşit ağırlıkta kabul edilerek elde edilen sonuçlara göre ise, %93.739'lük (3140.36 km²) alanı RES için uygun olmayan (0 puan), %0.005'lik (0.16 km²) alanı orta derecede uygun (2 puan), %5.571'lik (186.63 km²) alanı uygun (3 puan), %0.685'lik (22.96 km²) alanı çok uygun (4 puan) sınıfında çıkmıştır. Yapılan analizler sonucunda Kocaeli ilinde RES için, son derece uygun (5 puan) ve az uygun (1 puan) alan bulunmadığı görülmektedir.

İki farklı sonuç haritası karşılaştırıldığında, faktörleri eşit ağırlıkta kabul etmek, her bir faktör farklı etkiler barındırdığından doğru bir yaklaşım değildir ve yanlış sonuçlara yol açabilir. Çünkü, değerlendiriciler veya eğer oluşturulduysa ülkelerin RES konusundaki yönetmelikleri, ekonomik, sosyal veya çevresel hassasiyetler bakımından, önemseydiği olguyu ön planda tutarak, faktörlerin birbirleri karşısındaki önceliklerini mutlaka değerlendirecektir ve RES için yer seçimi bu önceliklere göre belirlenecektir. Faktörlerin öncelik durumları değerlendirilmeye başladığı anda ise, AHY, ELECTRE, VIKOR, TOPSIS, PROMETHEE ve Bulanık Kümeler gibi ÇKKA yöntemlerinin kullanılması, birçok faktörün etki ettiği bu tip çalışmalarda, doğru sonuca ulaşabilmek için büyük bir yardım sağlayacaktır. Literatürde yer alan, RES için en uygun yer araştırmasının yapıldığı çoğu çalışmada AHY kullanılmasına rağmen, ELECTRE (Atıcı vd., 2015) ve Bulanık Kümeler (Aydin vd., 2009; Latinopoulos & Kechagia, 2015) yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmada ÇKKA yöntemlerinden AHY'nin kullanılmasının sebebi, anlaması ve uygulaması kolay olması, hızlı bir şekilde çözüme gitmesi, kendi içinde kontrol mekanizması olması ve birçok çalışmada tercih edilmiş olmasıdır.

Çalışmada ayrıca, Kocaeli'nde bulunan RES'lerin yaklaşık konumları sonuç uygunluk haritaları üzerinde belirtilerek, değerlendirme analizi yapılmıştır. Buna göre Kandıra ve Şile RES uygun alanda, Dikili ve Gökdağ RES ise uygun olmayan alanda çıkmıştır. Dikili ve Gökdağ RES'in uygun olmayan alanda çıkmasının sebebi, bir veya birden çok faktörün, geçmiş çalışmalardan yola çıkılarak belirlenen, uygun olmayan (0 puan) sınıfında bulunmasıdır. Farklı sınıflandırmalar yaparak, farklı sonuçlar elde etmek mümkündür. RES için faktörler ve uygunluk sınıfları için ülkemizde bir yönetmelik bulunmamaktadır. Konunun uzmanları ile yapılan görüşmeler sonucunda, birçok faktörün etkisinin bulunduğu böyle bir projede, keskin sınırlar belirleyebilmenin pek mümkün olmadığı öğrenilmiştir. Bu tür projelerde yatırımcının, araştırmalarını yapıp, istenilen raporları hazırlayarak ilgili kurumlara başvurduğunu ve kurumların incelemelerini tamamlayıp karar verdiği öğrenilmiştir.

CBS ve AHY, bu ve bunun gibi birçok çalışmada kullanılabilecek etkili bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan faktörler arttırılarak daha kapsamlı sonuçlar elde edilebilmesi mümkündür. Kocaeli ili RES için yer seçimi analizi yapılan bu çalışmada, rüzgâr enerjisi için yüksek derecede olmasa da potansiyeli olan bir il olduğu sonucu elde edilmiştir. Halihazırda ilde bulunan RES'ler bu sonucu desteklemektedir. Bu potansiyel kullanılıp, en etkili şekilde değerlendirilmelidir. Çalışmamız, RES yer seçimi sürecinde, doğru ve ekonomik yatırımın yapılabilmesi için, CBS ve AHY kullanılarak başarılı sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir.

Teşekkür

Lisans derecesi bitirme projesinin makale formatına dönüştürüldüğü bu çalışmada, çalışma boyunca değerli zamanını ayırarak bizi motive eden, yol gösteren ve destek sağlayan saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Arzu Erener'e, gerekli bazı verilere ulaşmamızda bize kolaylık sağladıkları için Piri1513 Coğrafi Bilgi Sistemleri şirketi yetkililerine ve konunun uzmanı kişilerin görüşlerine ihtiyacımız olduğu durumlarda, bize bilgi, tecrübe ve görüşlerini aktaran TÜREB Kamu İşleri Yöneticisi Aytunç Bey'e ve çalışma arkadaşlarına teşekkür ederiz.

Yazar Katkısı

Serdar Ekiz: Fikir, Tasarım, Literatür Taraması, Veri Toplama ve İşleme, Analiz ve Yorumlama, Yazım. **Ahmet Şirin:** Fikir, Tasarım, Veri Toplama ve İşleme, Yazım. **Arzu Erener:** Tez ve Makale Denetimi, Danışmanlık.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Kaynaklar

- Aitzhanov, C. (2016). *Site Selection Technique For Wind Turbine Power Plants Utilizing Geographical Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP)* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Arca, D., & Çıtıroğlu, H. K. (2020). Rüzgâr Enerjisi Santral (RES) Yapım Yerlerinin CBS Dayalı Çok Kriterli Karar Analizi ile Belirlenmesi: Yenice İlçesi (KARABÜK) Örneği. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(2), 168-176.
- Artun, O. (2020). Determination of the Suitable Areas for The Investment of the Wind Energy Plants (WEP) in Osmaniye Using Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP). *European Journal of Science and Technology*, 20, 196-205.
- Atıcı, K. B., Şimşek, A. B., Ulucan, A., & Tosun M. U. (2015). A GIS-based Multiple Criteria Decision Analysis approach for wind power plant site selection. *Utilities Policy*, 37, 86-96.
- Aydin, N. Y., Kentel, E., & Duzgun, S. (2009). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 364-373.
- Baban, S. M. J., & Parry, T. (2000). Developing and Applying A GIS-Assisted Approach to Locating Wind Farms in The UK. *Renewable Energy*, 24(1), 59-71.
- Bennui, A., Rattanamane, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). Site Selection For Large Wind Turbine Using GIS. *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2007*, Phuket, Thailand.
- Can, G., & Yücel, M. A. (2019). Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Analitik Hiyerarşi Prosesi Kullanarak Rüzgâr Enerji Santralleri İçin Yer Tespiti. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 25-27 Nisan 2019, Ankara.
- Demirci, A. (2019). Kuruluş Yeri Seçiminde Analitik Hiyerarşik Süreç Yöntemi: Sağlık Kurumlarında Bir Uygulama. *Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 5(1), 39-55.
- Güler, D. (2016). *Analitik Hiyerarşi Yöntemi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Alternatif Katı Atık Düzenli Depolama Alanı Yer Seçimi: İstanbul İli Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Harker, P. T. (1989). *The Art and Science of Decision Making: Analytic Hierarchy Process*. In: *The Analytic Hierarchy Process*, 3-36, Berlin, Germany.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.
- Latinopoulos, D., & Kechagia K. (2015). A GIS-Based Multi-Criteria Evaluation For Wind Farm Site Selection. A Regional Scale Application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550-560.
- Memduhoğlu, A., Özmen, G., Göyçek, G., & Kılıç, F. (2014). Rüzgâr Türbini Kurulacak Alanların CBS – Çok Ölçütlü Karar Analizi Kullanılarak Belirlenmesi: Davutpaşa Kampüsü. *V. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu (UZAL-CBS 2014)*, 14-17 Ekim, İstanbul.
- Özşahin, E., & Kaymaz, Ç. K. (2013). Rüzgâr Enerji Santrallerinin (RES) Yapım Yeri Seçimi Üzerine Bir CBS Analizi: Hatay Örneği. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 6(2), 1-18.
- Pala, O. (2013). *Bulanık Mantık ve Çok Kriterli Karar Verme Uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Saat, M. (2000). Çok Amaçlı Karar Vermede Bir Yaklaşım: Analitik Hiyerarşi Yöntemi. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(2), 149-162.
- Saaty, T. L. (1986). Axiomatic Foundation of The Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 32(7), 841-855.
- Saaty, T. L. (1990). How to Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26.
- Saaty, T. L. (1994). How to Make A Decision: The Analytic Hierarchy Process. *Interfaces*, 24(6), 19-43.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). The Decision by The US Congress on China’s Trade Status: A Multicriteria Analysis. In: *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, (s.305-317).

- Sunak, Y., Höfer, T., Siddique, H., Madlener, R., & Doncker, R. W. D. (2015). A GIS-Based Decision Support System for The Optimal Siting of Wind Farm Projects. *E.ON Energy Research Center Series*, 7(2), RWTH Aachen University, Germany.
- Şimşek, G. (2020). *Modelling Site Selection Process For Wind Power Plants Through Free and Open Source GIS* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TÜREB (2020). *Türkiye Rüzgâr Santralleri Atlası*. Ocak-2020, Ankara.
- Tütek, H., Gümüsoğlu, Ş., & Özdemir, A. (2012). *Sayısal Yöntemler: Yönetmelik Yaklaşım*. Beta Basım Yayım Dağıtım, İstanbul.
- Urfalı, T., & Eymen, A. (2021). CBS ve AHP Yöntemi Yardımıyla Kayseri İli Örneğinde Rüzgâr Enerji Santrallerinin Yer Seçimi. *Geomatik Dergisi*, 6(3), 227-237.
- Yaralıoğlu, K. (2004). *Uygulamada Karar Destek Yöntemleri*. İzmir Ofset, İzmir.
- URL-1: <https://ekolojist.net/turkiyede-ruzgar-enerjisi/> (Erişim Tarihi: 19 Nisan 2021).
- URL-2: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar> (Erişim Tarihi: 19 Nisan 2021).
- URL-3: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-4: www.openstreetmap.org/export#map=9/40.7618/29.6603 (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-5: <http://birdmap.5dvision.ee/EN/2021/spring/?line=1&track=0&speed=1> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-6: <http://yebilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-7: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-8: <https://www.tarimorman.gov.tr/DKMP> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-9: <https://www.ozgurkocaeli.com.tr/haber/6651270/mahkeme-karamursel-res-projesini-durdurdu> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).
- URL-10: <http://web.shgm.gov.tr/doc5/2549-7.pdf> (Erişim Tarihi: 28 Nisan 2021).

Türkiye’de ulusal ve yerel sürekli gözlem yapan sabit GNSS istasyonları ağlarının mevcut durumu, standartlar ve farklı ağların entegrasyonu

Ömer Gökdaş^{1*} , Mustafa Tevfik Özlüdemir² 

¹Istanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ), İstanbul, Türkiye.

²Istanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

Öz: Türkiye Ulusal Sabit GPS Ağı-Aktif (TUSAGA-Aktif) sistemi 2009 yılından başlayarak, günümüzde Türkiye’de konum belirlemede en yaygın olarak kullanılan jeodezik altyapı unsuru olmuştur. Ağ-RTK ilkesi ile çalışan bu ağın yanı sıra, ülkemizde ağırlıklı olarak yerel yönetimler ve sayıları az da olsa özel sektör kuruluşları tarafından işletilen yerel Sürekli Gözlem Yapan Sabit GNSS İstasyonları (Continuously Operating Reference Stations, CORS) da mevcuttur. Ulusal ve yerel ölçekteki bu ağlar temel mühendislik çalışmalarının yanı sıra bilimsel amaçlı çalışmalarda da etkin olarak kullanılmaktadır. Yerel ağların ulusal TUSAGA-Aktif ağı ile tanımlanacak standartlar ekseninde entegrasyonu ülkemiz jeodezi topluluğunun gündemine alması gereken önemli bir konudur. Bu çalışmada farklı ülkelerde ulusal ve yerel düzeyde kurulan CORS ağlarına ve geliştirilen standartlara ilişkin örnekler verilmiş, Türkiye’deki mevcut durum ele alınmış, yerel ağların bilimsel çalışmalara sağlayabileceği katkılar ortaya koyulmuştur. Ulusal ve yerel CORS ağlarının karşılaştırmalarına yönelik yapılmış olan çalışmalar incelenerek istasyonlar arası mesafenin konum belirlemedeki önemi vurgulanmış; bu hususta yerel ağların ulusal ağa entegrasyonunun sağlayacağı katkılar ifade edilmiştir. Bu çerçevede entegrasyon sonucunda baz mesafelerinin kısalmasının, dolayısıyla nokta yoğunluğunun artmasının ağ çözüm kalitesine olumlu katkısının olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu gelişmenin sağlanabilmesi için, ülkemizde yerel ölçekte kurulan CORS ağlarının tasarım ve işletimi için standartların geliştirilmesi konusunun öncelikli olarak ele alınması gerektiği önerilmektedir.

Anahtar Sözcükler: GNSS, CORS ağları, Ağ RTK, Entegrasyon

Current situation of national and local CORS networks in Turkey, standards and their integration

Abstract: Turkey's National Permanent GNSS Network-Active (TUSAGA-Active) that has been started to use since 2009 is currently the most widely used geodetic infrastructure element in point positioning in Turkey. In addition to this network operating with the network RTK principle, there are also local Continuously Operating Reference Stations (CORS) networks in our country, which are mainly operated by local governments and a small number of private sector organizations. These networks, which are used nationally and locally, are used effectively in scientific studies as well as in basic engineering works. Integration of local networks in the axis of standards to be defined with the national TUSAGA-Active network is an important issue that should be on the agenda of our country's geodesy community. In this study, CORS networks established at national and local levels in different countries, and examples of the developed standards are given, the current situation in Turkey and contribution of local networks to the scientific studies are discussed. The studies conducted for the comparison of national and local CORS networks were examined, emphasizing the importance of distance between stations in determining the positioning. In this context, the contribution of local networks to the national network has been demonstrated. In this framework, it has been evaluated that shortening the baseline lengths as a result of integration and thus increasing the point density may contribute positively to the network solution quality. However, in order to achieve this development, it is recommended that the development of standards for the design and operation of CORS networks established locally in our country should be addressed with priority.

Keywords: GNSS, CORS networks, Network RTK, Integration

1. Giriş

Günümüzde yaygın olarak kullanılan Sürekli Gözlem Yapan Sabit GNSS İstasyonları (Continuously Operating Reference Stations, CORS) ağlarından jeodezi, jeofizik ve ölçme gibi birçok disiplinde fayda sağlanmaktadır. Başta haritacılık olmak üzere aktif olarak kullanılan CORS ağlarının diğer alanlarda da kullanımı artış göstermektedir. CORS ağlarının uygulamadaki faydaları ülkelerin haritacılık kuruluşlarını, yerel yönetimleri ve özel sektörü CORS ağı kurma fikrine yöneltmiştir (Kahveci, 2009).

Dünyada yürütülen önde gelen CORS ağı projelerinden biri Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bulunmaktadır. 230'dan fazla organizasyon tarafından desteklenen CORS ağı 2000'den fazla aktif istasyona sahiptir ve genişlemeye devam etmektedir. Hizmet dışı bırakılmış istasyonlarla beraber bu sayı 2718'dir. ABD'nin Ulusal Jeodezik Ölçme Kuruluşu (National Geodetic Survey, NGS) farklı işletmeciler tarafından yönetilen bu ağlardan gelen verileri entegre ederek ülkede ve sınır bölgelerinde meteoroloji, uzay araştırmaları, jeofizik uygulamaları gibi konularda çeşitli araştırmalar yapmaktadır. ABD'deki çok organizasyonlu bu ağ hükümet, akademi ve özel sektörün işbirliği ile işletilmektedir. Tüm organizasyonlar verilerini NGS ile paylaşmakta, NGS ise tüm yaptığı analiz çalışmalarını ücretsiz olarak yayımlamaktadır (URL-1).

Başka bir örnek Japonya'da faaliyet sürdüren GEONET CORS ağıdır. ABD'deki örnekten farkı merkezi olarak işletilmesidir. Bu ağ Japonya'da Jeo-Mekansal Bilgi Otoritesi (Geospatial Information Authority of Japan, GSI) tarafından işletilmekte, 1300'ü aşkın istasyona sahip olup genişlemeye devam etmektedir. Ağda istasyonlar arası mesafe ortalama 20 km'dir. Ağın temel kuruluş amacı, jeodezik çalışmalarda referans olarak kullanılması ve deprem hareketliliğinin izlenmesidir. Bunların dışında, navigasyon, meteoroloji, tsunami gözlemleri gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Miyahara, 2016; Tsuji, Kawamoto, & Abe, 2018).

Bir diğer örnek ise Almanya'dır. Bu ülkedeki CORS ağı için ABD'deki sisteme benzer bir yönetim benimsenmiştir. Almanya'daki 16 eyalet kendi CORS ağlarının tasarımı ve işletiminden sorumludur. Ayrıca Federal Almanya Cumhuriyeti eyaletlerinin araştırma idarelerinin çalışma grubu (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, AdV) tüm ağlardan sorumludur. AdV kullanıcılar için farklı doğrulukta üç farklı ürün sunmaktadır. Toplamda 270 referans istasyonuna sahip bu ağın adı Uydu Konum Belirleme Servisi'dir (Satellite Positioning Service, SAPOS) (Schwieger, 2012; URL-2).

Diğer örneklere bakacak olursak, Birleşik Arap Emirlikleri (BAE)'nin Dubai mevcut olan DVRS CORS ağı 2002 yılında 5 istasyon ile faaliyete başlamıştır. Haritacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Mevcutta 17 istasyonu bulunmaktadır ve merkezi sunucusunda Geo++ yazılımı kullanılmaktadır (El-Mowafy, Fashir, Al Marzooqi, Al Habbai, & Babiker, 2003; URL-3). Belçika'da faaliyet gösteren FLEPOS CORS ağının kurulumu 33 istasyon ile yapılmıştır. Mevcut durumda ise 45 adet istasyon sayısına ulaşmıştır. Merkezi yönetim tarafından işletilmektedir. Sunucuda Trimble firmasına ait CORS yazılımı bulunmaktadır (Yayla vd., 2020; URL-4). İsveç'te bulunan SWEPOS CORS ağı 1990'lı yılların başında Harita, Kadastro ve Tapu Dairesi tarafından Chalmers Teknoloji Üniversitesi ve Onsala Uzay Gözlem Evi iş birliğinde kurulmuştur. 472 adet istasyon sayısına sahip olan ağın istasyonlar arası mesafesi 10 - 70 kilometre aralığındadır (URL-5). Norveç'te bulunan SATREF/CPOS CORS ağı Norveç Haritalama Dairesi tarafından işletilmektedir. 270 adet istasyona sahiptir. Kullanıcı profili daha çok inşaat sektörüdür. Ölçme faaliyetlerinin dışında iyonosfer gözlemleri yapılarak iyonosferik etkinin radyo sinyallerine etkisi araştırılmaktadır (Follestad, Clausen, Moen, & Jacobsen, 2021). Hollanda'da faaliyet gösteren NETPOS CORS ağı, Hollanda'nın jeodezi altyapısının temeli olan Aktif GNSS Referans Sistemi'nin (AGRS) sıklaştırılması ile oluşturulmuştur. 29 adet istasyona sahip olup Hollanda Kadastro Servisi tarafından yönetilmektedir. Merkezi sunucuda

Geo++ yazılımı kullanılmaktadır (URL-6). Birleşik Krallık'ta ulusal koordinat sistemine geçişi sağlayan ağ ise OS Net CORS ağıdır. Ağ 115 adet istasyona sahiptir. 1791 yılından itibaren faaliyetlerini sürdüren ülkenin Haritacılık Kuruluşu (Ordnance Survey) tarafından yönetilmektedir (URL-7). Polonya'da mevcut bulunan ASG-EUSPOS CORS ağı ise Avrupa'ya ait olan konum belirleme sisteminin aktif bir jeodezik ağıdır. Polonya Jeodezi ve Kartografya Dairesi tarafından işletilmektedir. 2013 yılına kadar ülke genelinde tek olarak hizmet vermiştir. 2013 yılı itibari ile OS Net CORS ağına ek olarak ticari olarak yönetilen CORS ağları da oluşturulmuştur (SmartNet, TPINet, VRSNet) (Prochniewicz vd., 2020). Suudi Arabistan'da Haritacılık ve Jeouzamsal Bilgi Dairesi tarafından 209 istasyonlu KSA CORS ağı işletilmektedir. İstasyonlar arası mesafe diğer ağlara göre görece olarak fazladır (Abd Rabbou, Abdelazeem, & Morsy, 2021; URL-8). Yeni Zelanda'nın ulusal CORS ağı ise 2002'de 3 istasyon ile faaliyete başlayıp mevcutta 39 adet istasyon sayısına ulaşan PositioNZ CORS ağıdır. İstasyonların 35'i Yeni Zelanda'da, 1 adeti Chatham Adası'nda, 3 adeti ise Antarktika'da bulunmaktadır (URL-9).

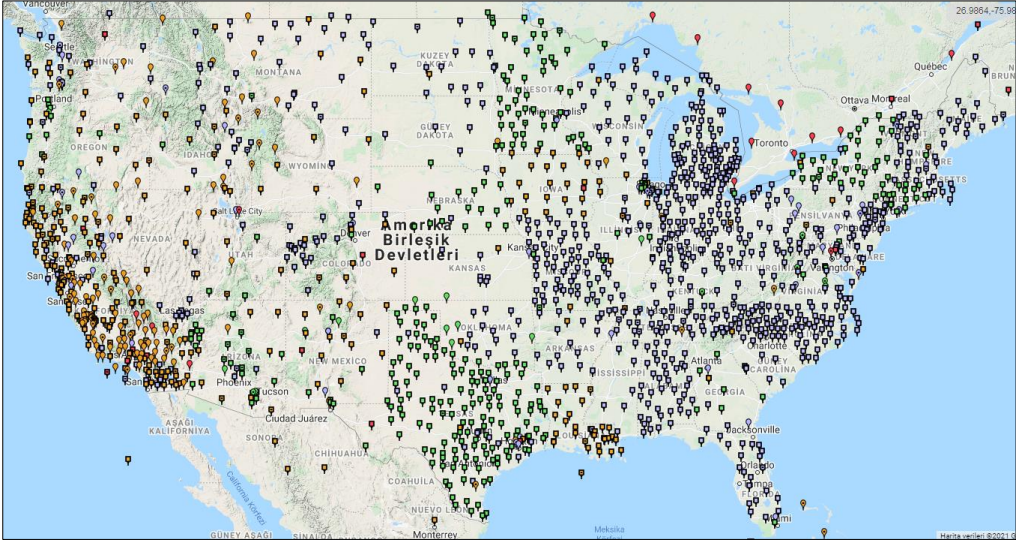
Tablo 1'de farklı coğrafyalardaki ülkelerde kurulmuş CORS ağı örnekleri verilmiştir. Tablo 1'de ülke isimleri, istasyon adlarının kısaltmaları ve istasyon sayıları gösterilmektedir. Ülkelere ait yüzölçümleri, kilometrekareye kaç adet istasyon düştüğü ve buna göre istasyonlar arası ortalama mesafeler belirtilmiştir.

Tablo 1'de sunulan sıralama istasyon sayılarına göre değil, ağların baz mesafelerine ya da istasyon yoğunluklarına dikkat edilerek düzenlenmiştir. Buna göre, ortalama baz mesafesinde verilen örnekler için Türkiye'nin görece düşük istasyon yoğunluğuna sahip ülkeler arasında olduğu görülmektedir. Tablo 1'de Türkiye'de mevcut olan CORS ağı Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ni de (KKTC) kapsadığı için yüz ölçümü buna dikkat edilerek verilmiştir.

Tablo 1: Dünyada CORS ağı örnekleri.

Ülke	Ağ Adı	İstasyon Sayısı	Yüz ölçümü (km ²)	İstasyon Yoğunluğu (km ² /istasyon sayısı)	Ortalama Baz Uzunluğu (km)
Dubai (BAE)	DVRS	18	4114	229	15
Japonya	GEONET	1300+	377 915	291	20
Belçika	FLEPOS	45	30 689	682	26
İsveç	SWEPOS	472	450 295	954	31
Almanya	SAPOS	270	357 386	1324	36
Norveç	SATREF/CPOS	270	385 207	1427	38
Hollanda	NETPOS	29	41 543	1433	38
Birleşik Krallık	OS Net	115	242 495	2109	46
Polonya	ASG-EUPOS	127	312 679	2462	50
ABD	NGS	2000+	9 834 000	4917	70
Türkiye	TUSAGA-Aktif	159	786 916	4949	70
Yeni Zelanda	PositioNZ	39	268 021	6872	83
S. Arabistan	KSA-CORS	209	2 150 000	10 287	101

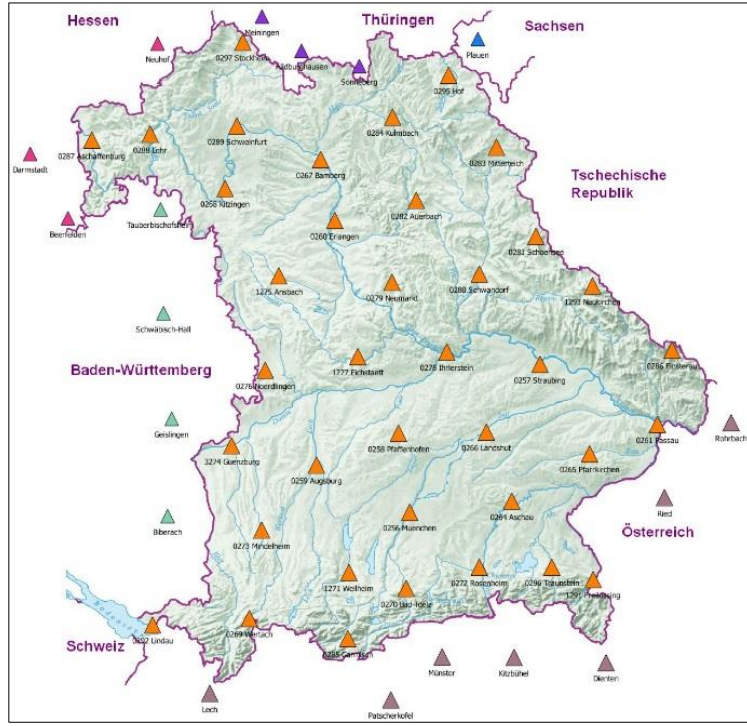
Şekil 1-5'te ise bu ağlara ilişkin istasyon dağılımlarını gösteren örnekler verilmiştir.



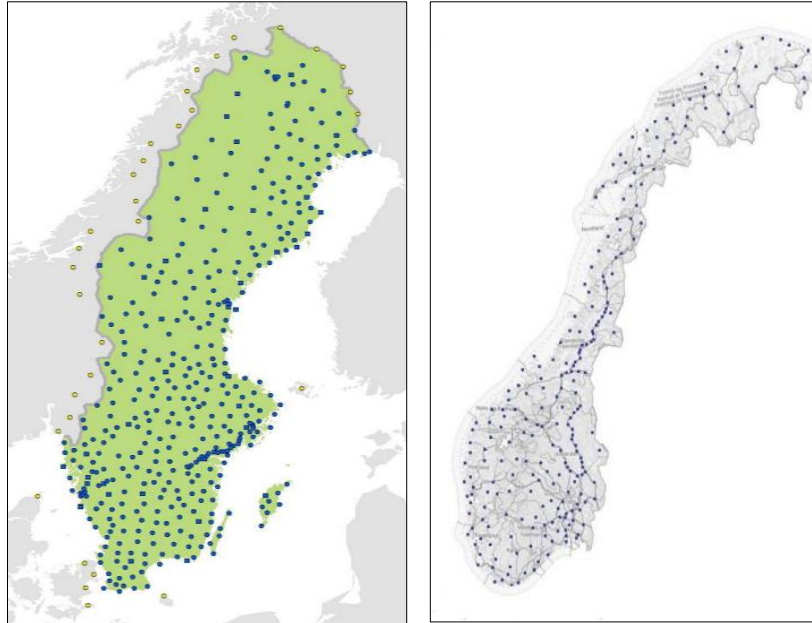
Şekil 1: NGS CORS ağı, ABD (URL-10).



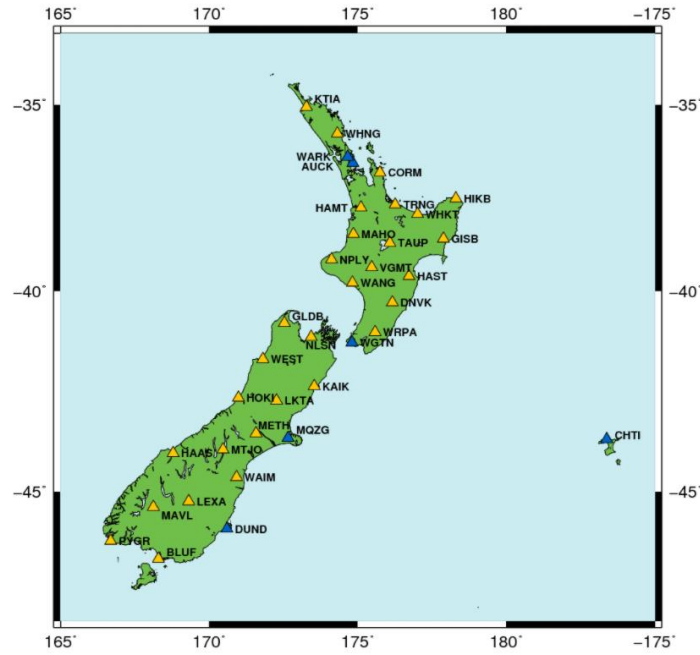
Şekil 2: GEONET CORS ağı, Japonya (URL-11).



Şekil 3: SAPOS CORS ağı, Almanya Bavyera Eyaleti (URL-12).



Şekil 4: (Solda) SWEPOS CORS ağı, İsveç (URL-13); (sağda) SATREF/CPOS CORS ağı, Norveç (URL-14).



Şekil 5: PositionNZ CORS ağı, Yeni Zelanda (URL-9).

Bu çalışma kapsamında, sözü edilen CORS ağlarının Türkiye’de ulusal ve yerel ölçekte kullanılan örneklerine yer verilmekte, CORS ağlarına ilişkin standartlar ele alınmakta ve yerel ağların ulusal CORS ağına entegrasyonunun önemi üzerinde durulmaktadır.

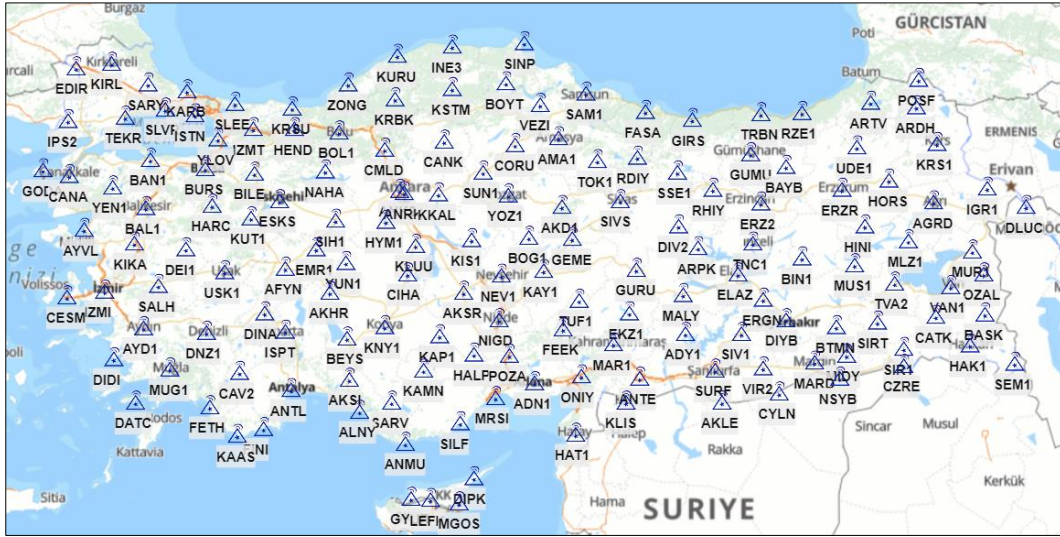
2. Ülkemizdeki CORS Ağları

2.1 TUSAGA-Aktif Ağı

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) desteğiyle bir Kamu Araştırma Geliştirme (AR-GE) projesi kapsamında geliştirilen TUSAGA-Aktif GNSS ağı 2009 yılında tamamlanmıştır. Nisan 2006 tarihinde TÜBİTAK tarafından kabul edilen proje, 8 Mayıs 2006’dan itibaren 36 aylık bir çalışma sonucunda tamamlanmıştır (Uzel vd., 2011).

TUSAGA-Aktif ağının tasarımı aşamasında istasyonlar arası mesafenin ne olması gerektiğine ilişkin teknik ve bilimsel çevrelerde bir tartışma yaşanmış, çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna göre sonuçların, baz uzunluğunun ortalama 80-100 km olacak şekilde yaklaşık 150 istasyon ile istenilen doğrulukta elde edilebileceği öngörülmüştür (Eren, Uzel, Güla, Yıldırım, & Cingöz, 2009). Bu tartışmalar sonucunda Türkiye genelinde ve KKTC’yi kapsayacak şekilde 147 istasyon ile TUSAGA-Aktif GNSS ağı kurulumu gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında ise tesis edilen yeni istasyonlar ile bu sayı 159’a çıkarılmıştır. Ağ, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından işletilmektedir (URL-15).

Şekil 6’da TUSAGA-Aktif ağına ait istasyon haritası gösterilmektedir. İstasyonların hızları HGM tarafından 2015 yılının 1. ayına kadar olan GPS gözlemlerinin incelenmesi ile hesaplanmıştır. Yapılan incelemede ağdan bağımsız hareket eden istasyonlar tespit edilerek sebepleri araştırılmıştır (Özdemir, 2016). Her bir istasyonda anlık olarak konum bilgileri ve atmosferik düzeltmeler hesaplandığından, kullanıcının seçeceği düzeltme modeli ile Denizcilik Radyo Teknik Komisyonu (Radio Technical Commission for Maritime, RTCM) veri iletim kanalı kullanılarak hassas konum bilgisi sağlanmaktadır. Bunun dışında, sistem atmosferin modellenmesi, tektonik hareketlerin incelenmesi gibi birçok bilimsel çalışmada kullanılmaktadır.



Şekil 6: TUSAGA-Aktif CORS ağı, Türkiye (URL-15).

TUSAGA-Aktif düzeltme yayımı ücretlidir. Aylık, yıllık ve bunların dışında belirli periyotlarda abonelik şartları mevcuttur. Üniversiteler ve diğer eğitim kurumlarında sadece kurum eğitim sınırları içerisinde ücretsizdir. Düzeltme yayımının dışında istasyonlara ait RINEX (Receiver Independent Exchange) verisi de kullanıcılar ile paylaşılmaktadır. 1 saniyelik veri ücretli olup, 30 saniyelik veri, düzeltme yayımına kayıtlı olan kullanıcılar için ücretsizdir. Yine eğitim kurumları için RINEX verisi paylaşımında belirli oranda indirim sağlanmaktadır. Deprem kuşağında bulunan Türkiye'de gerçekleşen 5 ve daha üzeri büyüklüklerdeki depremlerin ardından deprem bölgesinde bulunan TUSAGA-Aktif istasyonlarının verileri de ücretsiz olarak kullanıcılara sunulmaktadır (URL-15).

2.2 Yerel CORS ağları

Türkiye'de ülke genelini kapsayan TUSAGA-Aktif'in yanı sıra birçok yerel CORS ağı da mevcuttur. Çoğunluğu yerel yönetimler, az bir bölümü ise özel sektörün katılımı ile söz konusu yerel CORS ağlarının kurulum ve işletim faaliyetleri sürdürülmektedir. Bunların içinde, yerel yönetimler tarafından kurulan ilk yerel CORS ağı olan İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Uydulardan Konum Belirleme Sistemi (İSKİ UKBS) İstanbul genelinde 8 istasyon ile 2008 yılı sonunda kurulmuş, 2013 ve 2014 yıllarında 2 istasyonun daha ilave edilmesiyle istasyon sayısı 10'a çıkarılmıştır (Şekil 7). İstasyonlar arası mesafe yaklaşık 30 km'dir. İstasyon koordinatları dört adet Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS) istasyonu temel alınarak hesaplanmıştır (Eroğlu, Taftalı, Gökdaş, & Okur, 2017).



Şekil 7: İSKİ UKBS ağı, İstanbul (URL-16).

İSKİ UKBS ağı kullanım alanı yerel yönetimlerin gereksinim duyduğu konum bilgisinin üretimi ile sınırlı kalmamış, farklı iş kollarındaki serbest mühendislik faaliyetlerinde ve proje çalışmalarında altlık olarak sürekli kullanılır hale gelmesiyle yaygınlaşmıştır.

İSKİ UKBS, CORS ağı tasarım ve işletme konusundaki tecrübelerini diğer yerel yönetimlerle paylaşarak, örnek olmuştur. Diğer yerel yönetimlerin bir kısmı da, 6 istasyonlu Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (SASKİ) GNSS ağı ve 7 istasyonlu Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi'nin (BUSKİ) Sabit GNSS ağı (BUSAGA) örneklerinde olduğu gibi kendi yerel CORS ağlarını kurmuşlardır.

Tablo 2: Türkiye'deki mevcut ulusal ve yerel CORS ağları.

Bölge	Kurum Adı	Cihaz marka	İstasyon Sayısı
Türkiye-KKTC	TKGM-HGM	Trimble	159
Sakarya	Su ve Kanalizasyon İdaresi	Trimble	6
İstanbul	İSKİ	Topcon	10
Ankara	Ankara Büyükşehir Belediyesi	Topcon	10
Ankara	Tarım İşletmeleri G.M.	Topcon	5
Adana	Adana Su ve Kanalizasyon İdaresi	Topcon	9
Antalya	Antalya Elektrik Dağıtım	Topcon	9
Sivas	Çamlıbel Elektrik Dağıtım	Topcon	9
Bursa	Su ve Kanalizasyon İdaresi	Leica	7
Manisa	Büyükşehir Belediyesi	South	5
Aydın	Büyükşehir Belediyesi	South	5
Kocaeli	Su ve Kanalizasyon İdaresi	South	5
Muğla	Bodrum HKMO	South	5
Gaziantep	Büyükşehir Belediyesi	CHC	4
Malatya	Büyükşehir Belediyesi	CHC	5
Denizli	Özel Harita Bürosu	Spectra	4
Kayseri	Kayseri Büyükşehir Belediyesi	Spectra	3

Tablo 2'de Türkiye'de kurulan ulusal ve yerel CORS ağlarına ait bilgiler verilmiştir. Kurulumu gerçekleştiren kurum ya da sektör, kurulumun yapıldığı GNSS modeli ve faaliyet bölgesi bilgileri mevcuttur. Bunun yanında, ağ RTK ilkesi ile olmayıp tek bir istasyondan yayım yapan (single) RTK sistemleri de mevcuttur. Buna ait bilgi ise Tablo 3'te verilmiştir (Altın, 2021; Avcı, 2021; Özkan, 2021; Yıldız, 2021; Yılmaz, 2021). Tablo 2'de Türkiye'de TUSAGA-Aktif'in dışında yerel olarak oluşturulmuş 16 adet CORS ağına ait bilgiler verilmiştir. Buna göre yerel oluşturulan CORS ağlarının toplam istasyon sayısı 101 adettir. Tablo 3'te ise yerel yönetimlerin ve özel sektörün single RTK yöntemi ile işlettiği sistemlerdeki toplam istasyon sayısı 72'dir.

Tablo 3: Türkiye'deki mevcut single RTK sistemleri.

Bölge	Kurum Adı	Cihaz marka	Bölge	Kurum Adı	Cihaz marka
Çorlu	Çorlu Belediyesi	Trimble	Van	Büyükşehir Belediyesi	Topcon
Antalya	Antalya Su ve Atıksu İdaresi	Topcon	İzmir	Selçuk Belediyesi	South
Kocaeli	İzmit Gaz	Topcon	Hatay	Özel Harita Bürosu	South
Kütahya	Tavşanlı Belediyesi	Topcon	İzmir	Menderes Belediyesi	South
Çanakkale	Çan Linyitleri İşletmesi	Topcon	Şanlıurfa	Şanlıurfa Belediyesi	South
Kocaeli	İzmit Gaz (İZGAZ)	Topcon	Balıkesir	Balıkesir Belediyesi	South
Amasya	Amasya Belediyesi	Topcon	Tokat	Erbaa Belediyesi	South
Konya	Ereğli Belediyesi	Topcon	Antalya	Kaş Belediyesi	South
İstanbul	Paksoy Ofis	Topcon	Trabzon	Vakfikebir Belediyesi	South
Aksaray	Aksaray Belediyesi	Topcon	Maraş	Kahramanmaraş Belediyesi	South
Adana	Ciner Kozan Soda Elektrik	Topcon	Aydın	Söke Belediyesi	South
Eskişehir	Ciner Eti Soda	Topcon	Adapazarı	Özel Harita Bürosu	South
Şırnak	Ciner Silopi Elektrik	Topcon	İstanbul	Kandilli (Statik-12 adet)	CHC
Osmaniye	Osmaniye Belediyesi	Topcon	Samsun	Özel Firma	CHC
Aydın	Söke Tarım	Topcon	Mersin	Özel Firma	CHC
Şanlıurfa	Şanlıurfa Tarım	Topcon	Ankara	Özel Firma	CHC
İzmir	PETKİM Petro Kimya	Topcon	Niğde	Ömer Halisdemir Üniversitesi	Spectra
Konya	Büyükşehir Belediyesi	Topcon	Afyon	Kocatepe Üniversitesi	Spectra
Denizli	Belediye	Topcon	İstanbul	Yıldız Teknik Üniversitesi	Spectra
Gaziantep	Belediye	Topcon	Çanakkale	18 Mart Üniversitesi	Spectra
Samsun	Su ve Kanalizasyon İdaresi	Topcon	Trabzon	Karadeniz Teknik Üniversitesi	Spectra
Malatya	Belediye	Topcon	İzmir	Tire Belediyesi	Spectra
Mersin	Su ve Kanalizasyon İdaresi	Topcon	Kocaeli	Gölcük Belediyesi	Spectra
Çorum	Çorum Belediyesi	Topcon	Aydın	Nazilli Özel Harita Bürosu	Spectra
Konya	Ereğli Belediyesi	Topcon	Tekirdağ	Çerkezköy Özel Harita Bürosu	Spectra
Diyarbakır	Diyarbakır Belediyesi	Topcon	Bursa	HKMO	Spectra
Tokat	Belediye	Topcon	Antalya	Manavgat Özel Harita Büroları	Spectra
-	Kandilli (Statik-7 adet)	South	İstanbul-Bursa	DOHAD (Statik)	Spectra

3. Standartlar

CORS ağlarının kurulumu ve işletilmesine yönelik dünya genelinde standartların geliştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır. Örneğin NGS, yönettiği CORS ağları için bu standartları oluşturmuştur. Yerel CORS ağı kurucuları NGS tarafından belirlenmiş standartlara ve kurallara uymaktadır. Bu sayede GNSS sinyal bozulmalarının en aza indirgenmesi ve GNSS konum belirleme kalitesinin en üst seviyeye çıkarılması amaçlanmıştır. NGS, ağ kapsama ihtiyaçlarına ve istasyonların iletişim gücüne dikkat ederek yerel ölçekte oluşturulan ağları bünyesine katmakta, standartları da yeni oluşan şartlara göre çeşitli zamanlarda güncellemektedir. NGS, ilk olarak 2005 yılında belirlemiş olduğu standartları en son 2018 yılında güncellemiştir (NGS, 2018). Bir başka örnek Avustralya'dır. Burada, Ölçme ve Harita Üretimi Hükümetler arası Komitesi (Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping, ICSM) benzer şekilde bu standartları oluşturmuştur (ICSM, 2014).

Türkiye'de de CORS ağlarına yönelik standartlar geliştirilmektedir. Jeodezik çalışmalarda ulusal TUSAGA-Aktif ağının kullanımı için standartlar Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY) ile belirlenmiştir (URL-17). Türkiye'de yerel ölçekte oluşturulan ağların TUSAGA-Aktif ağına katılımı yasal bir dayanağı olmadığı için mümkün değildir. Bununla birlikte BÖHHBÜY hükümleri uyarınca tescile konu işlerde yerel CORS ağları kullanılabilen, bunun için bu ağların 2 yılda bir HGM tarafından tescili gerekmektedir. HGM, yerel ağ istasyonlarını, uydu görünürlük durumlarını, koordinat ve hız değerlerini inceleyerek belirlediği standartlara göre tescil edebilmektedir. Buna göre tek bir istasyondan tescile konu işlerde 5 km kapsamında RTK yapılabilir (URL-15).

Ülkemizde yerel CORS ağlarının kurulması ve kullanımı konusunda kurumların temel aldığı normlar söz konusu olabilmektedir. Örneğin İSKİ UKBS ağının kurulumunda, istasyon yerlerinin belirlenmesinde İstanbul ili ve yakın çevresini kapsamaması, iletişim altyapısının hazır olması, güvenli olması, enerji sıkıntısının yaşanmaması gibi hususlara dikkat edilmiş ve bu çerçevede İSKİ işletme binalarında karar kılınmıştır. Hangi binaların kullanılacağı hususunda ise referans istasyonunun kurulacağı yerde zeminin sağlamlığı, en yakındaki fay hattı, ulaşımın yılın kaç günü sağlanabildiği, alıcının bulunduğu kabin ile anten arasındaki kablunun uzunluğu, anten uydu yükseklik açısı için 5 derecenin üzerinde engel oluşturacak nesnelere varlığı, GNSS sinyallerini etkileyecek yüksek gerilim hattı, telsiz, TV ve radar merkezinin varlığı, paratoner sisteminin mevcudiyeti gibi ölçütler araştırılmıştır. İşletimine ve kullanılmasına yönelik ise, iş sonu projelerinde, yaptırılan harita ölçüm ihalelerinde İSKİ UKBS ağı kullanımının da belirtildiği teknik şartnameler İSKİ tarafından her yıl düzenlenmektedir (İSKİ, 2021). Başka bir yerel CORS ağı örneği olan BUSAGA ağının kullanımı, paylaşımı ve uygulanmasına ilişkin ise BUSKİ Genel Müdürlüğü tarafından Harita Bilgi ve Belgeleri Kullanım Yönetmeliği hazırlanmıştır (BUSKİ, 2016).

4. Yerel CORS ağlarının bilimsel çalışmalara katkıları ve entegrasyonu

Yerel ölçekte oluşturulan CORS ağları haritacılık faaliyetleri dışında bilimsel çalışmalarda da fayda sağlamaktadır. İSKİ UKBS ağı örneğinde görüleceği gibi, ağı gerçek zamanlı düzeltme yayımı ve kesintisiz sağladığı statik veri, akademik ve bilimsel çalışmalarda da kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir. İSKİ UKBS ağı verileri kullanılarak, proje ve araştırma faaliyetleri, makale, bildiri, bilimsel çalışmalar, lisans ve lisansüstü tez çalışmaları tamamlanmış ya da üzerinde çalışılmaya devam edilmektedir. Bu çerçevede İstanbul Kültür Üniversitesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) gibi akademik ve bilimsel kuruluşlara çalışmalarında destek amaçlı veri sağlanmıştır.

Yüksek lisans ve doktora düzeyinde yapılan lisansüstü tezlerde yerel CORS ağları ulusal ağlar ile beraber değerlendirilerek kabuk deformasyon analizleri ve bu ağlara ait hız kestirimleri yapılmıştır (Bak, 2014; Demirci, 2012; Kara, 2018; Özbey, 2017; Temiz, 2015). İnsansız hava aracı ile gerçekleştirilen fotogrametrik ölçümlerde yerel CORS ağı verileri kullanılmıştır.

Bu sayede başlangıç dış yöneltme parametreleri belirlenmiş ve doğruluk analizleri yapılmıştır (Turan, 2019). Farklı senaryolar ile yerel CORS ağlarının bilimsel çalışmalara katkıları ve ulusal ağlara entegrasyonunun önemini irdelendiği bir başka çalışmada kısa baz mesafelerinin özellikle tamsayı belirsizlik çözüm hızında ve yükseklik bileşeninde anlamlı etkileri ortaya konmuştur (Gökdaş, 2020). Yerel CORS ağları kullanılarak farklı GNSS ölçme tekniklerinin karşılaştırması yapılmıştır (Gündüz, 2013; Gürel, 2010; Ögütçü, 2017; Öcalan, 2015; Sengü, 2012; Subaşı, 2011; Selbesoğlu, 2011; Pektaş, 2010). Yerel CORS ağı çözümleri ile elde edilen troposfer kestirimleri ile yüzey atmosferik değerler kullanılarak su buharı kestirimleri yapılmıştır (Gökdaş, 2014).

Lisansüstü tezlerin dışında birçok saygın akademik dergide makaleler yayınlanmış ve bilimsel paylaşım yapılmıştır. Bu hususta, yerel CORS ağı kullanılarak uydu görünürlüğü açısından düşük olan ormanlık alanlarda GNSS ölçme teknikleri analizi yapılmıştır (Pırtı & Hoşbaşı, 2019; Pırtı, 2020). Bağıl ve Hassas Mutlak Konum Belirleme (Precise Point Positioning, PPP) tekniklerini kullanan web tabanlı servislerin konum belirleme doğruluk analizleri yerel CORS ağı verileri ile analiz edilmiştir (Öcalan, Erdoğan, & Tunalihoğlu, 2013). Yerel CORS ağının hız kestirimleri belirlenerek yer kabuğu hareketleri ile karşılaştırılmış ve web tabanlı servislerin hız kestirimindeki doğruluk analizleri yapılmıştır (Gökdaş & Özlüdemir, 2021). Yerel CORS ağı verileri deformasyon analizi ve yapı sağlığı izleme çalışmalarında kullanılmıştır (Akpınar, Aykut, Dindar, Gürkan, & Gülal, 2017; Gümüş & Selbesoğlu, 2019). Yerel CORS ağı kullanılarak baz mesafesinin doğruluk, presizyon ve tamsayı belirsizlik çözüm oranı üzerindeki etkisi araştırılmış ve GNSS ölçmelerinde baz mesafesi ile ölçmelere ait varyans değeri arasında matematiksel bir model oluşturulmuştur (Gökdaş & Özlüdemir, 2020a). Yerel CORS ağından türetilen troposfer gecikme değerleri ile su buharı kestirimleri yapılmış ve doğrulukları analiz edilmiştir (Gökdaş & Özlüdemir, 2020b).

Bu çalışmalarla beraber ulusal ağların uluslararası entegrasyonu, yerel ağların ise ulusal ağlara nasıl entegre edilecekleri, ağların tasarım ilkelerinin ve nokta yoğunluğunun ne olması gerektiği tartışılmaya devam edilmektedir (Doğan, Ergintav, Çetin, Özdemir, & Çakır, 2017; Kenyeres vd., 2019). Bu konuda geliştirilecek çözümler hem kaynakların verimli kullanılması hem de ağıdan beklenen performansın güvence altına alınması açısından önemlidir.

Önceki bölümde sunulan Tablo 2 ve Tablo 3'te görüleceği üzere, Türkiye'de yerel yönetimler ve özel işletmeler tarafından bağımsız olarak işletilen birçok yerel ağ mevcuttur. Ancak bu ağların birbirleri ile bilgi paylaşımı kısıtlı olup entegre edilebilmiş değildirler. Mevcut ağlardan en üst düzeyde fayda sağlanması amacı ile standartlarının merkezi bir otorite tarafından belirlenip denetlenmesi ve entegrasyonlarının sağlanması gerekmektedir. Önceki bölümde belirtilen BÖHHBÜY'deki belirlenmiş standartların gereksinimleri karşılayacak nitelik ve içeriğe sahip olacak şekilde geliştirilmesi önem taşıyan bir konudur. Bu çerçevede jeodezik faaliyetler için yerel CORS ağı başlığının düzenlenmesi ve yerel ağların TUSAGA-Aktif ağına entegrasyonu konusu da Türkiye jeodezi topluluğu ve sorumlu kurumlar tarafından ele alınması gereken güncel bir başlıktır. Bu hedef bu ağların hem pratik haritacılık faaliyetlerinde hem de bilimsel çalışmalarda daha etkin kullanılabilmesi için önerilmektedir.

Bu hususta, özellikle İSKİ UKBS ağı özelinde yapılan uygulamalar, yerel ağların ulusal ağlara entegrasyonunun ne derece önemli olduğunu ön plana çıkarmıştır. Yerel CORS ağlarının ulusal TUSAGA-Aktif ağına entegrasyonu ile nokta yoğunluğunun artırılacağı ve geometrinin güçlendirilmesi ile elde edilen çözüm kalitesinin iyileştirileceği değerlendirilmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışma ile farklı ülkelerde ulusal düzeyde gerçekleştirilen CORS ağı projelerine ve geliştirilen standartlara ilişkin örnekler verilmiş, Türkiye'deki mevcut durum ele alınmıştır. Bu hususta TUSAGA-Aktif ağı istasyon yoğunluğunun diğer verilen örneklerdeki ülkelere ait CORS ağlarındaki nokta sıklığı ile karşılaştırıldığında görece düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışmada TUSAGA-Aktif ağının yanı sıra hem yerel yönetimler hem de özel sektör tarafından geliştirilmekte olan yerel CORS ağlarına ilişkin istatistiksel veriler paylaşılmıştır. Özellikle İSKİ UKBS yerel CORS ağı özelinde yapılan öğretim, araştırma, bilimsel çalışmalar incelenmiş ve ulusal ağa entegrasyon konusu değerlendirilmiştir. Özetle, kurulan yerel CORS ağlarının istasyonlar arası baz mesafesini kısalttığı, bunun da pratik haritacılık faaliyetlerinde konum belirleme doğruluğunu ve çözüm hızını artırdığına dikkat çekilmiştir. Bilimsel çevrelerde yerel CORS ağlarının entegrasyonunun yapılan çalışmalarda kısıtlı da olsa sağlandığı, gerek ulusal gerekse yerel CORS ağları verilerinin birlikte değerlendirildiği çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar da entegrasyonun sağlayacağı iyileştirici katkıları ortaya koymaktadır. Yerel CORS ağlarını işleten kurumların bilgi paylaşımlarını artırmasının sözü edilen kısıtlılığı büyük oranda ortadan kaldıracığı ifade edilebilir. Pratik haritacılık faaliyetlerindeki entegrasyon sorununun ise Türkiye jeodezi topluluğunun önderliğinde sorumlu kurumlar tarafından geliştirilmesini önerdiğimiz CORS ağı kurulum ve işletim standartları ile aşılabileceği; BÖHHBÜY kapsamında jeodezik çalışmalar için yerel CORS ağlarının kullanımı başlığının düzenlenmesinin bu sürecin temel yasal altlığı oluşturacağı değerlendirilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, bu çalışmada bilinen ilgili herhangi bir finansal veya finansal olmayan çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Yazar Katkısı

Ömer Gökdaş: Literatür taraması, Analiz ve yorumlama, Yazım, Veri toplama ve işleme. **Mustafa Tevfik Özdemir:** Fikir, Tasarım, Denetleme, Yazım, Makale değerlendirme, Analiz ve yorumlama.

Kaynaklar

- Abd Rabbou, M., Abdelazeem, M., & Morsy, S. (2021). Performance Evaluation of Triple-Frequency GPS/Galileo Techniques for Precise Static and Kinematic Applications. *Sensors*, 21(10), 3396.
- Akpınar, B., Aykut, N.O., Dindar, A.A., Gürkan, K., & Güllal, E. (2017). Ağ RTK GNSS Yönteminin Yapı Sağlığı İzleme Çalışmalarında Kullanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(3), 1030-1040.
- Altın, M. (2021). GNSS Teknik. Kişisel görüşme. 5 Mart 2021, İstanbul.
- Avcı, Ö. (2021). Sistem A.Ş. Kişisel görüşme. 15 Mart 2021, İstanbul.
- Bak, M. (2014). *Jeodezik Çalışmalarla İzmit Körfezi ve Yakın Çevresi Kabuk Deformasyonlarının Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 356068.
- BUSKİ. (2016). *Harita Bilgi ve Belgeleri Kullanım Yönetmeliği*. BUSKİ Genel Müdürlüğü. No:15.
- Demirci, P. (2012). *Yerel, Ulusal ve Uluslararası Sabit Referans İstasyonlarının Kabuk ve Yapısal Deformasyon Belirleme Amaçlı Tasarlanan Jeodezik Ağlara Entegrasyonu, Ölçme ve Değerlendirme Stratejileri*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 315335.
- Doğan, U., Ergintav, S., Çetin, S., Özdemir, A., & Çakır, Z. (2017). Sürekli GNSS İstasyonları İçin Yeni Bir Yaklaşım: Marmara Entegre GNSS Ağı (MEGA). *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Bilimsel Toplantısı 2017*.

- El-Mowafy, A., Fashir, H., Al Marzooqi, Y., Al Habbai, A., & Babiker, T. (2003). Testing the Dubai virtual reference system (DVRS) National GPS-RTK network. In *Satellite Navigation Systems* (pp. 141-150). Springer, Dordrecht.
- Eren, K., Uzel, T., Gulal, E., Yildirim, O., & Cingoz, A. (2009). Results from a comprehensive Global Navigation Satellite System test in the CORS-TR network: Case study. *Journal of Surveying Engineering*, 135(1), 10-18.
- Eroğlu S., Taftalı G., Gökdaş Ö., & Okur Ö. (2017). Uydulardan Konum Belirleme Sistemi (UKBS). *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Bilimsel Toplantısı 2017*.
- Follestad, A. F., Clausen, L. B. N., Moen, J. I., & Jacobsen, K. S. (2021). Latitudinal, Diurnal, and Seasonal Variations in the Accuracy of an RTK Positioning System and Its Relationship With Ionospheric Irregularities. *Space Weather*, 19(6).
- Gökdaş, Ö. (2014). *GPS Meteorolojisi: İstanbul için Bir Uygulama* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 349843.
- Gökdaş, Ö. (2020). *Yerel Jeodezik GNSS CORS Ağları ve Bilimsel Çalışmalara Katkıları: İSKİ UKBS Örneği*, (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 652824.
- Gökdaş, Ö., & Özlüdemir, M. T. (2020a). A variance model in NRTK-based geodetic positioning as a function of baseline length. *Geosciences*, 10(7), 262.
- Gökdaş, Ö., & Özlüdemir, M. T. (2020b) Effect of altitude and distance on zenith tropospheric delay and integrated water vapour estimations in a local GNSS CORS network. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 8(1), 72-83.
- Gökdaş, Ö., & Özlüdemir, M. T. (2021). Velocity estimation performance of GNSS online services (APPS and AUSPOS). *Survey review*, 53(378), 280-288.
- Gümüş, K., & Selbesoğlu, M. O. (2019). Evaluation of NRTK GNSS positioning methods for displacement detection by a newly designed displacement monitoring system. *Measurement*, 142, 131-137.
- Gündüz, A.M. (2013). *Klasik RTK ve ağ-RTK Yöntemlerinin Karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 335381.
- Gürel, N. (2010). *Yapılmış ve Ağaçlık Bölgelerde Tek Sabit Referans İstasyonunun Kullanılabilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 259788.
- ICSM. (2014). *Guideline for Continuously Operating Reference Stations*.
- İSKİ. (2021). *İş Sonu Projeleri Teknik Şartnamesi*. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi. No: H.21.10.3.1.
- Kahveci, M. (2009). Gerçek Zamanlı Ulusal Sabit GNSS CORS Ağları ve Düşündürdükleri. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (100), 13-20.
- Kara, İ. (2018). *Orta Marmara Fayının Kinematığının GPS Ölçmeleriyle İzlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 511483.
- Kenyeres, A., Bellet, J. G., Bruyninx, C., Caporali, A., De Doncker, F., Droscak, B., Duret, A., Franke, P., Georgiev, I., Bingley, R., Huisman L., Jivall, L., Khoda, O., Kollo, K., Kurt, A. I., Lahtinen, S., Legrand, J., Magyar, B., Mesmaker, D., Morozova, K., Nagl, J., Özdemir, S., Papanikolaou, X., Parseliunas, E., Stangl, G., Ryczywolski, M., Tangen, O. B., Valdes, M., Zurutuza, J., & Weber, M. (2019). Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. *GPS Solutions*, 23(4), 1-17.
- Miyahara, B. (2016). GEONET, CORS Network of Japan. *Geospatial and GNSS CORS Infrastructure Forum*. Kuala Lumpur - Malaysia.
- NGS, (2018). *Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS)*.
- Öcalan, T., Erdoğan, B., & Tunalioglu, N. (2013). Analysis of web-based online services for GPS relative and precise point positioning techniques. *Boletim de ciencias geodesicas*, 19(2), 191-207.
- Öcalan T. (2015). *GNSS Ağlarında GPS Hassas Nokta Konumlama (GPS-PPP) Tekniği Yaklaşımli Çözümler* (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 414154.
- Öğütçü, S. (2017). *Ağ Bazlı RTK Tekniklerinin (VRS, FKP, MAC) Baz Uzunluğu ve Epok Sayısına Bağlı Doğruluk ve Duyarlık Modellerinin Oluşturulması Üzerine Bir Çalışma* (Doktora Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 493842.
- Özbey, V. (2017). *Orta Marmara Fayının Kinematığının GPS Ölçmeleriyle Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 467206.
- Özdemir, S. (2016). TUSAGA ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının hassas koordinat ve hızlarının hesaplanması üzerine. *Harita*

Dergisi, 155, 53-81.

Özkan, K. (2021). Paksoy Hizmetler. Kişisel görüşme. 10 Mart 2021, İstanbul.

Pektaş, F. (2010). *Gerçek Zamanlı Ulusal ve Yerel Sabit GNSS Ağlarına Dayalı Kinematik Konumlama (TUGASA-Aktif - İSKİ-UKBS Ağlarının Yerel Ölçekte Karşılaştırılması)* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 295706.

Pırtı, A. (2020). Millimeter Level Accuracy Point Positioning in Woodland Area by Using Hybrid Method. *Forestry Ideas*. Vol: 26, No: 1, (59), 119–131.

Pırtı, A., & Hoşbaş, R. G. (2019). Role of CORS RTK (Network RTK) Mode Measurements in Determination of the Forest Boundary: A Case Study of İSKİ-CORS. *Forestry Ideas*. Vol: 25, No: 2, (58), 394–403

Prochniewicz, D., Szpunar, R., Kozuchowska, J., Szabo, V., Staniszevska, D., & Walo, J. (2020). Performance of Network-Based GNSS Positioning Services in Poland: A Case Study. *Journal of Surveying Engineering*, 146(3).

Schwieger, V. (2012). An Example of Terrestrial Reference Frame Realisation: Germany. *IAG/FIG Commission 5/ICG Technical Seminar*. Rome, Italy

Selbesoğlu, M.O. (2011). *GNSS Ağlarından Üretilen Sanal Referans İstasyonu (VRS) Verilerinin Kalite Kontrolü ve Doğruluk Araştırması* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 297164.

Sengü, M.Ö. (2012). *Yerleşim Alanlarında CORS Yönteminin Kadastral Ölçmelerde Uygulanabilirlik Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 322675.

Subaşı, H.K. (2011). *İnternet Tabanlı GPS Değerlendirme Servislerinin Doğruluk ve Performans Analizi: İstanbul Örneği* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 307116.

Temiz, H.Ş.P. (2015). *İSKİ UKBS Ağı İstasyonlarının Zamansal Yer Değişimlerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 389396.

Tsuji, H., Kawamoto, S., & Abe, S. (2018). Application of GNSS CORS for Precise Positioning and Earthquake Research in Japan. *ICG Working Group D Reference Frames, Timing and Applications*. Xi'an, China

Turan, E. (2019). *Comparison of Satellite Positioning Techniques on Unmanned Aerial Vehicle Based Photogrammetry* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye. YÖK'nin Tez Veri Tabanından erişildi. No: 613291.

Uzel, T., Eren, K., Güllal, E., Dindar, A.A., Tiryakioğlu, İ., & Yılmaz H. (2011). TUSAGA Aktif (CORS-TR) Verileri ile Tektonik Plaka Hareketlerinin İzlenmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. 18-22 Nisan 2011, Ankara.

Yayla, G., Van Baelen, S., Peeters, G., Afzal, M. R., Catoor, T., Singh, Y., & Slaets, P. (2020). Accuracy Benchmark of Galileo and EGNOS for Inland Waterways. In *Proceedings of the International Ship Control Systems Symposium (iSCSS)*, Delft, The Netherlands (pp. 6-8).

Yıldız, S. (2021). Graftek A.Ş. Kişisel görüşme. 20 Mart 2021, İstanbul.

Yılmaz, M. (2021). Geomatik Hizmetler. Kişisel görüşme. 1 Mart 2021, İstanbul.

URL-1: NGS, <https://catalog.data.gov/dataset/national-geospatial-data-asset-ngda-continuously-operating-reference%20stations-cors%20> (Erişim Tarihi: 1 Şubat 2021)

URL-2: SAPOS GNSS ağı. <http://www.adv-online.de/Products/SAPOS/>, (Erişim Tarihi:2 Şubat 2021).

URL-3: Dubai (BAE) DVRS GNSS ağı. <https://www.dm.gov.ac/survey-department/dubai-virtual-reference-station/>, (Erişim Tarihi: 16 Haziran 2021).

URL-4: Belçika FLEPOS GNSS ağı. http://gnss.be/networks_tutorial.php, (Erişim Tarihi: 17 Haziran 2021).

URL-5: İsveç SWEPOS GNSS ağı. <https://www.gsc-europa.eu/news/galileo-in-the-permanent-cors-network-in-sweden-a-success-story>, (Erişim Tarihi: 17 Haziran 2021).

URL-6: Hollanda NETPOS GNSS ağı. <https://www.nsgi.nl/netpos>, (Erişim Tarihi: 18 Haziran 2021).

URL-7: Birleşik Krallık OS NET GNSS ağı. <https://www.ordnancesurvey.co.uk/business-government/tools-support/os-net/positioning>, (Erişim Tarihi: 20 Haziran 2021).

URL-8: Suudi Arabistan KSA-CORS GNSS ağı. <https://www.gasgi.gov.sa/En/Products/Geodesy/Pages/KSA-CORS.aspx>, (Erişim Tarihi:

19 Haziran 2021).

URL-9: PositioNZ GNSS ağı. <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-services/positionz>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-10: NGS GNSS ağı istasyon haritası. https://geodesy.noaa.gov/CORS_Map/, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-11: https://fig.net/resources/proceedings/2013/2013_reference_frame_in_practice_comm5/1.4_geonet_imakiire.pdf, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-12: SAPOS GNSS ağı istasyon haritası. <https://www.adbv-immenstadt.de/produkte/dienste/sapos/allgemeines.html>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-13: SWEPOS GNSS ağı istasyon haritası. https://eurogeographics.org/wp-content/uploads/2018/04/14_National_report_Sweden.pdf, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-14: SATREF/CPOS GNSS ağı istasyon haritası. <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2020/jensen.pdf>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-15: TUSAGA-Aktif. <https://www.tusaga-aktif.gov.tr/>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-16: İSKİ UKBS ağı. <https://global.topnetlive.com/Admin/Turkey/Networks/ISKI/Stations>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

URL-17: Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/3.5.201811962.pdf>, (Erişim Tarihi: 2 Şubat 2021).

Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi

Journal of Geodesy and Geoinformation

İÇİNDEKİLER - CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Toprak neminin yarı kurak alanlarda çok zamanlı RADARSAT-2 verileri ile incelenmesi
Analysis of soil moisture in semi-arid areas with multi-temporal RADARSAT-2 data 1-11
Sevinç MADENOĞLU, Hesna ÖZCAN, Murat Remzi PEKER, Melis Özge PINAR, Suat AKGÜL, Mehmet KEÇECİ, Tülay TUNÇAY, Mahmut Hilmi SEÇMEN, Ali KOÇ, Mustafa ÜSTÜNER, Alihsan ŞEKERTEKİN, Saygın ABDİKAN, Mustafa Tolga ESETLİLİ, Aynur ŞENSOY ŞORMAN, Şinasi KAYA, Günay ERPUL, Füsün BALIK ŞANLI
- ITRF96-ED50 Transformasyonu: Radyal esaslı enterpolasyon ve küresel harmonik modelleme
ITRF96-ED50 Conversion: Radial basis interpolation and modelling with spherical harmonics 12-23
İlke DENİZ, Şenol Hakan KUTOĞLU, Rasim DENİZ
- Kentsel teknik altyapı tesislerine yönelik uluslararası coğrafi veri modellerinin analizi
An analysis of international geospatial information models for urban utility networks 24-46
Azer İLGAR, Volkan ÇAĞDAŞ
- Sentinel-2 görüntüleri ve ICESat-2 ATL03 foton yükseklik verilerinin kombinasyonu ile batimetri haritası üretilebilirliğinin araştırılması
Investigation on the generation of bathymetric maps by combining Sentinel-2 imagery and ICESat-2 ATL03 photon height data ... 47-58
Mehmet Güven KOÇAK
- En uygun rüzgâr enerji santrali yerlerinin coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi: Kocaeli ili örneği
Determination of the most suitable wind power plant locations with geographical information systems: Kocaeli province example .. 59-79
Serdar EKİZ, Ahmet ŞİRİN, Arzu ERENER
- Derleme/Review**
- Türkiye’de ulusal ve yerel sürekli gözlem yapan sabit GNSS istasyonları ağlarının mevcut durumu, standartlar ve farklı ağların entegrasyonu
Current situation of national and local CORS networks in Turkey, standards and their integration 80-94
Ömer GÖKDAŞ, Mustafa Tefik ÖZLÜDEMİR