



**SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ TABANLI
SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ
HESAPLAMALARI: ESKİŞEHİR
ÖRNEKLEMİ**

Yüksek Lisans Tezi

Gizem ÖZKAYA

Eskişehir 2024

**SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ TABANLI SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ
HESAPLAMALARI: ESKİŞEHİR ÖRNEKLEMİ**

Gizem ÖZKAYA

Yüksek Lisans Tezi

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Resul ÇÖMERT)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gizem ÖZKAYA'nın SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ TABANLI SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ HESAPLAMALARI: ESKİŞEHİR ÖRNEKLEMİ başlıklı çalışması 02/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK

Üye

: Doç. Dr. S. Sefa BİLGİLİOĞLU

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Hakan UYGUÇGİL

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

02/08/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Gizem ÖZKAYA, SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ TABANLI SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ HESAPLAMALARI: ESKİşEHİR ÖRNEKLEMİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK

ÖZET

SAYISAL YÜKSEKLİK MODELİ TABANLI SOLAR ENERJİ POTANSİYELİ HESAPLAMALARI: ESKİŞEHİR ÖRNEKLEMİ

Gizem ÖZKAYA

Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2024

Danışman: Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Resul ÇÖMERT)

Enerji taleplerinin daha etkin ve çevre dostu yaklaşımlarla karşılanması ihtiyacı yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi artırmıştır. Bu çerçevede, yatırım maliyetinin çok kısa bir zamanda karşılanması ve çevreye olumsuz etkisi bulunmaması güneş enerjisini ön plana çıkartmaktadır. Güneş enerjisinden etkin bir biçimde yararlanabilmek için solar radyasyon potansiyelinin doğru bir şekilde tespit edilmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada Eskişehir iline ait farklı çözünürlükteki Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) kullanılarak, ArcGIS yazılımının Area Solar Radiation (ASR) ve Point Solar Radiation (PSR) araçlarında, çalışma alanına en uygun radyasyon parametreleri ve topografik parametreler optimize edilmeye çalışılmıştır. Optimize edilen bu değerler kullanılarak alansal ve noktasal olmak üzere iki farklı şekilde solar radyasyon hesabı yapılmış ve hem girdi veri çözünürlüğünün hem de farklı parametre değerlerinin hesaplanan solar radyasyon değerleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Hesaplama sonuçları gözlem istasyonlarında ölçülen 2022 yılı yıllık toplam global güneş radyasyonu verileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işleminde hesaplamalara ait karesel ortalama hata (RMSE) oranı ve bağıl hata hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde noktasal bazlı hesaplamalarda en iyi sonucu 0.06 bağıl hata ile SRTM verisi, alansal bazlı ortalama solar radyasyon değerleri hesabında en iyi sonucu 0.0 bağıl hata ile TANDEM-X verisi ve alansal bazlı hesaplamalarda istasyon noktalarında hesaplanan değerler incelendiğinde en iyi sonucu 0.18 bağıl hata ile SRTM verisi vermiştir.

Anahtar Sözcükler: Coğrafi bilgi sistemleri, Sayısal yükseklik modeli, Solar radyasyon, Solar analiz.

ABSTRACT

DIGITAL ELEVATION MODEL BASED SOLAR ENERGY POTENTIAL CALCULATIONS: ESKİŞEHİR SAMPLE

Gizem ÖZKAYA

Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2024

Supervisor: Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Resul ÇÖMERT)

The need to meet energy demands with more effective and environmentally friendly approaches has increased the tendency towards renewable energy sources. In this context, the fact that the investment cost is covered in a very short time and does not have a negative impact on the environment brings solar energy to the fore. In order to benefit from solar energy effectively, it is extremely important to accurately determine the solar radiation potential. In this study, by using Digital Elevation Models (DEM) of different resolutions of Eskişehir province, the most suitable radiation parameters and topographic parameters for the study area were tried to be optimized in the Area Solar Radiation (ASR) and Point Solar Radiation (PSR) tools of the ArcGIS software. Using these optimized values, solar radiation was calculated in two different ways, area and point, and the effect of both input data resolution and different parameter values on the calculated solar radiation values was analyzed. The calculation results were compared with the annual total global solar radiation data for 2022 measured at observation stations. In the comparison process, the mean square error (RMSE) rate and relative error of the calculations were calculated. When the results are examined, the best result in point-based calculations is SRTM data with a relative error of 0.06, the best result in areal-based average solar radiation values calculation is TANDEM-X data with a relative error of 0.0, and when the values calculated at station points in areal-based calculations are examined, the best result is SRTM with a relative error of 0.18. gave data.

Keywords: Geographic information systems, Digital elevation model, Solar radiation, Solar analyst.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın gerçekleştirilmesinde üç yıl boyunca değerli bilgi, birikim ve deneyimleriyle beni yönlendiren, her görüşmemizde bana kıymetli zamanlarını ayıran, sabırla ve ilgiyle bana yardımcı olabilmek için ellerinden gelenin fazlasını yapan ve her sorun yaşadığımda yanlarına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzlerini ve samimiyetlerini benden esirgemeyen kıymetli hocalarım Prof. Dr. Saye Nihan ÇABUK'a ve Dr. Öğr. Üyesi Resul ÇÖMERT'e teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Lisansüstü eğitim süresince yanımda olan ve beni destekleyen başta Hasan Hüseyin UYSAL olmak üzere Erdal DUYGUN'a, Ahmet Turan OKTAY'a, Bilal YILDIRIM'a, Nazmiye YAVUZ'a, Buse ŞAHİN'e ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Son olarak her zaman yanımda olan ve koşulsuz şartsız beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim anneme, babama ve kardeşime maddi ve manevi bütün emekleri için teşekkür ediyorum.

Gizem ÖZKAYA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Gizem ÖZKAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Önem	4
1.3. Sınırlılıklar.....	5
1.4. Literatür Özeti.....	6
2. KURAMSAL TEMELLER	8
2.1. Güneş Enerjisi	8
2.2. Elektromanyetik Radyasyon	8
2.3. Güneş Açıları.....	10
2.4. Solar Radyasyon.....	12
2.5. Solar Radyasyonun Ölçülmesi	13
2.5.1. Yersel Ölçümler	13
2.5.2. Uydu Tabanlı Ölçümler	15
2.5.2.1. <i>SYM tabanlı modeller</i>	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	20

3.1. Çalışma Alanı	20
3.2. Materyal	22
3.2.1. SYM Verileri	23
3.2.2. Meteorolojik Gözlem İstasyonu Verileri	27
3.3. Yöntem	28
3.3.1. Global Solar Radyasyonun Hesaplanması	31
3.3.2. RMSE Oranı ve Bağlı Hata Hesaplamaları	34
3.3.2.1. ASR ve PSR aracında yer alan parametreler	35
4. BULGULAR	38
4.1. Meteoroloji Gözlem İstasyonu Verileri Kullanılarak Solar Radyasyon Hesabı	38
4.2. Parametre Optimizasyonu	38
4.3. SYM Verileri Kullanarak Solar Radyasyon Hesabı	40
4.3.1. Noktasal olarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları	41
4.3.2. Alansal olarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları	43
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	50
5.1. Sonuç	50
5.2. Tartışma	53
5.3. Öneriler	55
KAYNAKÇA	56
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Spektral bölgeler ve dalga boyları aralığı	10
Tablo 3.1. İstasyonlara ait eğim, bakı ve engel durumu	21
Tablo 3.2. ASR aracında yer alan parametreler	35
Tablo 4.1. PSR aracında 4 farklı CD değerine göre hesaplanan solar radyasyon değerleri	39
Tablo 4.2. PSR aracında radyasyon parametre değerlerine göre hesaplanan solar radyasyon değerleri	39
Tablo 4.3. Çalışmada noktasal ve alansal solar radyasyon hesabı için optimize edilen parametre değerleri.....	40
Tablo 5.1. SRTM verisi üzerinden yapılan optimizasyon işlemi öncesi ve sonrası değerler	50
Tablo 5.2. PSR aracında en doğru sonucu veren SYM verileri	51
Tablo 5.3. ASR aracında en doğru sonucu veren SYM verileri.....	51
Tablo 5.4. Fark, RMSE oranı ve bağıl hata tablosu	53
Tablo 5.5. Enlem değeri $\pm 2^\circ$ alınarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Elektromanyetik dalgalar	9
Şekil 2.2. Solar radyasyon spektrumu	10
Şekil 2.3. Yılın farklı zamanlarında dünyanın yörüngesi ve deklinasyonu.....	11
Şekil 2.4. Piranometrenin iç yapısı.....	14
Şekil 2.5. Piranometre	14
Şekil 2.6. Pirheliyometre	15
Şekil 3.1. Çalışma alanı lokasyon haritası.....	22
Şekil 3.2. Çalışma alanına ait SRTM SYM verisi.....	24
Şekil 3.3. Çalışma alanına ait TANDEM-X SYM verisi	25
Şekil 3.4. Çalışma alanına ait EUEDEM SYM verisi.....	26
Şekil 3.5. Çalışma alanına ait ALOS/PALSAR SYM verisi.....	27
Şekil 3.6. Yöntem akış şeması.....	29
Şekil 3.7. Yöntem iç akış şeması.....	31
Şekil 4.1. İstasyonlara ait 2022 yılı global solar radyasyon değerleri.....	38
Şekil 4.2. Odunpazarı/Kireçköyü istasyonuna ait solar radyasyon değeri	41
Şekil 4.3. Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonuna ait solar radyasyon değeri.....	42
Şekil 4.4. İnönü/THK Tesisleri istasyonuna ait solar radyasyon değeri	42
Şekil 4.5. ALOS/PALSAR solar radyasyon haritası	43
Şekil 4.6. EUEDEM solar radyasyon haritası.....	44
Şekil 4.7. TANDEM-X solar radyasyon haritası.....	44
Şekil 4.8. SRTM solar radyasyon haritası	45
Şekil 4.9. Odunpazarı/Kireçköyü istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri	46
Şekil 4.10. Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri.....	46
Şekil 4.11. İnönü/THK Tesisleri istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri.....	47
Şekil 4.12. Odunpazarı/Kireçköyü istasyonuna ait OSR değerleri	48
Şekil 4.13. Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonuna ait OSR değerleri	48
Şekil 4.14. İnönü/THK Tesisleri istasyonuna ait OSR değerleri.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
ALOS/PALSAR	: Advanced Land Observing Satellite
ASR	: Alansal Solar Radyasyon
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CD	: Calculation Direction
DEM	: Digital Elevation Model
DF	: Diffuse Proportion
DLR	: Alman Uzay Ajansı
dR	: Rayleigh Optik Kalınlığı
E	: Elektrik Alan
EDT	: Enerji Depolama Tesisi
EGG08	: European Gravity and Geoid Project 08
ESRA	: Avrupa Solar Radyasyon Atlası
ESRI	: Environmental Systems Research Institute
ETRS89	: European Terrestrial Reference System 1989
EU-DEM	: European Digital Elevation Model
EU GMES	: Global Monitoring for Environment and Security
EVRS2000	: European Vertical Reference Frame 2000
GDEM	: Global Digital Elevation Model
GES	: Güneş Enerji Santrali
GIS	: Geographical Information Systems (Coğrafi Bilgi Sistemleri)
GRS80	: Geodetic Reference System 1980
Hz	: Hertz
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar
JERS-1	: Japon Yer Araştırma Uydusu-1
JRC	: Joint Research Centre
KWh	: Kilowatt saat
kWh/m ²	: Kilowatt saat/ metrekaare
LAEA	: Lambert Azimuthal Equal-Area projection
m	: Göreceli Optik Hava Kütlesi

M	: Manyetik Alan
M ²	: Metrekare
Mw	: Megawatt
MWe	: Megawatt elektrik
MWh	: Megawatt saat
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
nm	: Nanometre
OSR	: Ortalama Solar Radyasyon
P -P	: Proton - Proton
PSR	: Noktasal Solar Radyasyon
RDA	: Referans Veri Erişimi
RMSE	: Root Mean Square Error
SAR	: Sentetik Açıklıklı Radar
SRTM	: <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SYM	: Sayısal Yükseklik Modeli
T	: Transmittivity
TANDEM-X	: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements
TAPES-G	: Çevre Bilimleri için Arazi Analiz Programları
THK	: Türk Havacılık Kurumu
TL	: Linke Bulanıklık Faktörü
Wp	: Watt peak
WRC	: Dünya Radyasyon Merkezi

1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacının her geçen gün artması, fosil yakıtların olumsuz çevre etkileri ve rezervlerinin tükenmekte olması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan güneş enerjisi, pek çok alanda kullanılabilmesi, çok kısa zamanda yatırım maliyetini karşılaması ve fosil kaynakların aksine çevre dostu olması nedeniyle dünya genelinde tercih edilmektedir (Öztürk, 2018).

Güneş enerjisi dünyada en hızlı büyüyen enerji sektörüdür. Günümüzde ülkelerin sosyo-ekonomik gelişiminin önündeki en büyük engellerden biri enerjinin ucuz, güvenilir ve kolay ulaşılabilir bir şekilde sağlanmasıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak verimli ve ucuz enerji üretim/kullanım teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik birçok çalışma devam etmektedir. Özellikle nüfus artışının da etkisiyle kentleşme ve sanayileşme, fosil yakıtlardan sağlanan enerjiye olan talebin yıllar geçtikçe daha da artmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların tükenmesi ve fiyatlarının artmasının yanı sıra çevreye verdiği zararlar ve insan sağlığına etkileri de önemli konulardır (Öztürk, 2018).

Dünya üzerindeki konumu açısından Türkiye'nin güneşlenme alanı ve süresi oldukça fazladır. Bu nedenle güneş enerjisi ülkemiz için de tercih edilen bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisinden faydalanma kapasitesi incelendiğinde, çoğu Avrupa ülkesinden fazla olduğu görülmektedir (Belgin Dikmen ve Gültekin, 2011). Güneş enerjisi kapasitesinin etkin kullanımı için öncelikle güneş enerjisinin kullanıldığı tüm alanlarda solar radyasyon bilgisinin kesin doğrulukla belirlenmesi gerekmektedir (Aras vd., 2006). Solar radyasyon bilgisi, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi, doğal kaynakların devamlılığının sağlanması, işletmede olan ve işletmeye geçecek sistemlerin kapasitelerinin belirlenmesi ve arttırılması gibi pek çok konuda önemli rol oynamaktadır (Ertekin ve Yıldız, 1999).

Solar radyasyon, güneş tarafından yayılan ve uzayda her yöne elektromanyetik dalgalar halinde gönderilen enerjidir. Güneşten doğrudan gelen ve yayılan tüm ışınların adı olarak da bilinir ve kısa dalga radyasyonu olarak adlandırılır. Solar radyasyon atmosfere girdiğinde bir kısmı emilir, bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı da dağılır. Radyasyonun yansımadan veya saçılmadan doğrudan Dünya'ya ulaşan kısmına doğrudan radyasyon denir. Dünyaya ulaşan dağılan radyasyon miktarına dağılma radyasyonu denir. Radyasyonun yansıyan kısmına ise albedo denir. Bir yüzeye düşen toplam radyasyon

miktarı bu üç radyasyonun toplamına eşittir ve buna global radyasyon veya toplam radyasyon adı verilir.

Solar radyasyonu değerlerine, meteorolojik istasyonlarda bulunan ölçüm cihazları kullanılarak yersel ölçümlerle direkt olarak veya tahmin modelleri ile yaklaşık olarak ulaşılmaktadır. En doğru ve kesin global solar radyasyon değerleri, doğrudan meteorolojik yer gözlem istasyonlarında yapılan ölçümler ile elde edilmektedir. Ancak dünya üzerinde yeterli sayıda solar radyasyon ölçümü yapan istasyon bulunmadığı gibi mevcutlar da homojen bir dağılım da göstermemektedir. Ayrıca yer gözlem istasyonlarının ilk kurulumlarının maliyetli olması, ölçüm aletlerinin rutin bakım ve onarımı gibi dezavantajları söz konusudur (Ruşen, 2017).

Yer gözlemlerinde karşılaşılan bu problemler, araştırmacıları solar radyasyonun tahmini için farklı tahmin modellemesi çalışmalarına yönlendirmiştir. Önceleri sadece istasyonlarda yersel ölçümler sonucu ölçülen verilerle yapılan modelleme çalışmaları, son zamanlarda uydu teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, yer gözlem istasyonu verisine ihtiyaç duymadan ve sadece uydu görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Uydu görüntülerinin çözünürlüğüne bağlı olarak çok daha kısa mesafeler için solar radyasyon tahmini yapılabilmektedir (Özdemir, 2012). Meteorolojik uydular kullanılarak yapılan tahmin yöntemlerinde, uydular çok geniş alanları kısa zamanda ve yüksek konumsal çözünürlükte tarayarak görüntüler elde etmektedir. Bu avantajlar sayesinde, uydu görüntüleri global ve yaygın solar radyasyon tahminini yapmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Karaveli ve Akınoğlu, 2018).

Son zamanlarda solar radyasyonu modellemek için farklı teknikler geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu tekniklerden biri de geniş alanlarda solar radyasyonu hızlı, düşük maliyetli ve doğru bir şekilde modellemek için bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)'ne entegre edilmiş Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) kullanarak yapılan modellemedir. SYM, bir dizi hücre boyunca topografik yüksekliği temsil eden dijital bir kartografik veri kümesidir. Her hücre, bir özelliğin kendi konumundaki yüksekliğini temsil eder. SYM "çıplak toprak" temsili olarak düşünülebilir çünkü vadiler, dağlar gibi jeolojik (zemin) özelliklerin yüksekliği hakkında bilgi içerir. Bitki örtüsü veya binalar gibi zemin dışı unsurlarla ilgili herhangi bir yükseklik verisi içermezler (Http-1).

SYM, geniş alanlarda topografyanın solar radyasyon üzerindeki zamansal ve konumsal dağılımında oynadığı rolün dikkate alınmasına olanak tanır. SYM, kapsadığı alandaki her nokta için yapay ufku ve güneşin göreceli konumunu sağlar. Bu sayede

Çalışma alanının her noktası için zaman fark etmeksizin güneşin göreceli konumu göz önüne alınarak solar radyasyon tahmin edilebilir. Solar Analyst (Solar Analiz), r.sun, Solei-32 ve SRAD günümüzde ön plana çıkan SYM tabanlı modellerdir (Tovar vd., 2006).

Özetlenen ihtiyaç ve gelişmeler ışığında bu yüksek lisans tezinde solar radyasyon hesabının SYM üzerinden hesaplanması ve bu süreçte farklı parametrelerin ölçüm/tahminleme sonuçlarına etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olarak belirlenen Eskişehir ili için farklı çözünürlükteki 4 farklı SYM kullanılarak Solar Analiz modeliyle entegre olarak alışan ArcMap yazılımı vasıtasıyla solar radyasyon hesabı gerçekleştirilmiştir. Yazılımın solar radyasyon hesabı yapan ASR ve PSR araçlarından faydalanan araştırmada, topografik parametreler (yükseklik, hesaplama yönü) ve radyasyon parametreleri (yaygın oran, iletkenlik) optimizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sonucunda elde edilen sonuçlar ise yersel ölçüm verileriyle karşılaştırılmış.ve çalışma alanına en uygun parametre değerleri bu sayede tespit edilmiştir.

Tez alışması boyunca her istasyon için optimize edilen parametre değerleri referans alınarak farklı çözünürlükteki SYM verileri üzerinden solar radyasyon hesabı yapılmıştır. Böylece girdi verinin çözünürlük değerinin hesaplanan solar radyasyon değerleri üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Değerlendirme ve analiz işlemleri için RMSE oranı ve bağıl hata hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Eskişehir ilinde solar radyasyon ölçümü yapan gözlem istasyonu verileri kullanılmıştır. Bunun için Meteoroloji Genel Müdürlüğü veri arşiv sisteminden 2022 yılına ait günlük toplam global solar radyasyon verileri temin edilmiştir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, farklı SYM'ler baz alınarak solar radyasyon tahminleme süreçlerinin araştırılması ve SYM tabanlı solar radyasyon belirleme süreçlerinde farklı parametrelerin etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçlar doğrultusunda;

- Çalışma alanına uygun parametre optimizasyonu yapılması solar radyasyon değerlerini nasıl etkiler?
- SYM verilerinin sahip olduğu çözünürlük değerlerinin solar radyasyon değerleri üzerindeki etkisi nedir?

sorularına cevap aranmıştır.

Bu çerçevede, yüksek lisans tezi, Eskişehir iline ait 12,5 m, 25 m, 27 m ve 28 m çözünürlüklü SYM'ler kullanılarak, çalışma alanına en uygun radyasyon parametre değerlerini ve topografik parametre değerlerini tespit etmeye odaklanmaktadır. Bu doğrultuda yaygın oran, geçirgenlik ve hesaplama yönü parametreleri, alabilecekleri maksimum ve minimum değerler arasında farklı kombinasyonlara tabi tutulmuştur. Ayrıca hesaplanan alansal ve noktasal solar radyasyon değerleri çalışma alanında bulunan Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası, İnönü/THK Tesisleri ve Odunpazarı/Kireçköyü istasyonlarına ait yersel ölçüm değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma işleminde RMSE oranı ve bağıl hata hesaplanmıştır. Böylelikle çözünürlüğün ve parametre optimizasyonunun solar radyasyon değerleri üzerindeki etkisinin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Araştırmanın genel planı ise aşağıda özetlenmiştir:

- Birinci bölümü giriş kısmı oluşturmaktadır. Giriş kısmında; çalışmanın amacı ve dayanağına ilişkin genel bir bilgi, tezin amacı, kapsamı, önemi, sınırlılıkları ve örnek çalışmalara yer verilmiştir.
- İkinci bölüm, kuramsal temellerden meydana gelmektedir. Bu bölümde; güneş enerjisine, elektromanyetik radyasyona, solar radyasyona ve solar radyasyonun ölçülmesinde kullanılan yöntemlere yer verilmiştir.
- Üçüncü bölümde çalışma alanına ait genel bilgiler, araştırma kapsamında kullanılan veri setleri ve özellikleri, çalışmanın yöntemi, solar radyasyonun hesaplanması ve ASR ve PSR araçlarında yer alan parametreler hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.
- Dördüncü bölüm, çalışma boyunca kullanılan ASR ve PSR araçlarında yer alan parametrelerin optimizasyonunu ve bu değerler kullanılarak yapılan analizlere ve bu analizler sonucu ortaya çıkan çıktılarına odaklanmaktadır.
- Son bölümde ise elde edilen bulgulara ilişkin değerlendirilmeler ve öneriler yer almaktadır.

1.2. Önem

Çağımızda ulusal ve uluslararası arenada nüfusun hızla artması etkeni, fosil yakıtların zamanla tükenmesi ve çevreye verdiği olumsuz etkilerden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan talep giderek artmaktadır. Güneş enerjisi, diğer yenilenebilir

enerji kaynaklarına göre potansiyeli ve kullanım kolaylığı nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle bu enerjisi konusunda yüksek bir potansiyele sahip olmasına rağmen bu potansiyeli yeterince etkin ve yaygın kullanamamaktadır. Bu sebeple enerjide dışa bağımlılık fazladır ve her yıl enerji ithalatına milyarlarca dolar para harcanmaktadır. Güneş enerjisinin aktif olarak kullanılması ülkemize ekonomik ve çevresel açıdan büyük faydalar sağlayacak olup, bu sebeple solar radyasyon miktarının doğru bir şekilde modellenmesi ve kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Solar radyasyon miktarının hesaplanmasında yersel ölçümlerin maliyetli olması ve zaman alması sebebiyle uydu tabanlı ölçümler giderek ivme kazanmıştır. Bu ölçümlerde veri kaynağına ulaşım sorunsuz, düşük maliyetli ve hızlıdır. Uydu tabanlı ölçümlerde SYM'ler üzerinden hesaplamalar yaygın olarak yapılmakta olup, bu çalışmada da farklı çözünürlüklere sahip SYM verileri kullanılmıştır. Çalışma alanı olan Eskişehir ilinde CBS olanakları kullanılarak farklı çözünürlükte SYM verileri üzerinden solar radyasyon değişim analizi yapan başka bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada çözünürlük faktörü ve topografik parametreler göz önüne alınarak solar radyasyon hesapları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar yersel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulguların, Eskişehir ili genelinde Güneş Enerji Santrallerine (GES) yatırım yapacak kişilere ve kuruluşlara birer altlık teşkil etmesi, Eskişehir ili genelinde yapılacak çalışmalarda araştırmacılara kolaylık sağlaması beklenmektedir.

1.3. Sınırlılıklar

Çalışmanın başlıca sınırlılıkları kullanılan verilerin kapsamı ve niceliğine ilişkindir. Çalışma alanında yer alan istasyonlarda 2020, 2021, 2022 yıllarına ait yersel ölçüm değerleri incelendiğinde 2020 ve 2021 yıllarında ölçüm değerlerindeki veri eksikliği ve sürekliliğin sağlanamaması, Eskişehir ilinde mevcut olan 17 meteorolojik istasyondan sadece 3 tanesinde yersel ölçümlerle solar radyasyon ölçümü yapılması bu çalışmanın sınırlılıklarını oluşturmaktadır.

Ayrıca istasyonların bulunduğu konumlarda, meydana gelebilecek konumsal bazı bir hatayı minimize etmek için; raster haritalarda, istasyon noktalarının denk geldiği piksellere komşu olan pikselleri de içine alan 50 m yarıçapında tampon bölgeler oluşturulmuştur.

1.4. Literatür Özeti

Literatürde yüksek lisans tezinin amacı ve kapsamına benzer araştırmanın sonuçlarını içeren pek çok ulusal ve uluslararası çalışma bulunmaktadır. İncelenen literatür örneklerinin ortak amacı solar radyasyonun farklı metotlar kullanılarak modellenmeye çalışılmasıdır. Bu çalışmaların önemli bir bölümünde farklı yöntemlerle solar radyasyon hesabı yapılarak hem yöntemlerin doğruluğu karşılaştırılmış hem de yöntemler arası korelasyon kurulmuştur. Bu bölümde, bahsi geçen literatüre ait genel bilgiler özetlenmiştir.

Bessafi vd. (2018), çalışmalarında 1. ve 2. nesil 250 metre konumsal çözünürlüğe sahip Meteosat verileri kullanmışlardır. Yer ölçümleri için 1999- 2015 periyotlu (2006 yılı hariç) 32 istasyon verisi kullanmış olup, seçilen her nokta için yükseklik ve eğim dikkate alınmıştır.

Tovar vd. (2006), çalışmalarında karmaşık topoğrafyaya sahip alanlarındaki solar radyasyonun tahmini için topografik bilgi sağlamada SYM kullanışlılığını analiz etmişlerdir. Çalışmalarında Mart 2003 ve Ocak 2006 arasındaki dönemde ortalama olarak her ay için 3 gün belirlemişlerdir. Hesaplamalarda Solar Analiz, r.sun, Solei-32 ve SRAD modelleri ve 20 m ve 100 m çözünürlüğe sahip 2 farklı SYM verisi kullanılarak Güney İspanya’da bulunan 14 radyometrik istasyonda toplanan 40 günlük veri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda Solar Analiz’in SYM çözünürlüğüne karşı en düşük hassasiyeti gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Đuračiová ve Pružinec (2022), yaptıkları çalışmada arazi parametrelerinin ve SYM'nin konumsal çözünürlüğünün solar radyasyon potansiyeli hesaplanması üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamışlardır. Konumsal çözünürlüğün etkisini ortaya koymak için hesaplamaları tek bir SYM verisi üzerinden 5 m, 10 m, 30 m ve 90 m olmak üzere yeniden örnekleme işlemi uygulayarak 4 farklı çözünürlüğü göre yapmışlardır. Sonuçta solar radyasyon hesaplama hataları ile dar alanlarda topografik konum indekslerinin mutlak değerleri arasında orta düzeyde bir korelasyon (0,32–0,46) olduğunu tespit etmişlerdir.

Bayram (2022) tarafından yapılan çalışmada yer ölçümleri ve uydu görüntüleri (Heliosat- Meteoronorm Veri tabanı- EU-PVGIS Yazılımı) karşılaştırılmıştır. Yer ölçüm verileri 2005- 2018 periyotlu olup, Heliosat yöntemi için uydu verileri ise 2014-2020 periyotludur. Çalışma sonunda yapılan analizlerde (korelasyon, R^2), solar radyasyon

tespitinde en doğru sonuçları yer ölçüm verilerinin, yer ölçüm verilerinin mevcut olmadığı alanlarda Heliosat modelin verdiğini tespit edilmiştir.

Kausika ve van Sark (2021), araştırmalarında, ArcMap programı kullanarak Hollanda'ya ait global solar radyasyon tahmininde, yayılma ve geçirgenlik parametrelerinin optimizasyonunu ele almışlardır. Kontrol amacıyla yer ölçüm verilerinin yanı sıra son 10 yıllık solar radyasyon verilerini de kullanmışlardır. Bu modelin kalibre edilmesinin, solar radyasyon hesaplamalarını en az %10-20 oranında iyileştirdiği, periyotların aylık seçildiğinde ise daha yüksek doğrulukta sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde literatür araştırması kapsamında ele alınan konuya ilişkin temel bilgilere yer verilmiştir.

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneş tarafından üretilen her türlü enerjidir. Güneş, yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ W güç yayan, çevre dostu bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneşten yayılan bu enerjinin Dünya yüzeyine ulaşan miktarı oldukça azdır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1.367 W güç düşmektedir (Http-2).

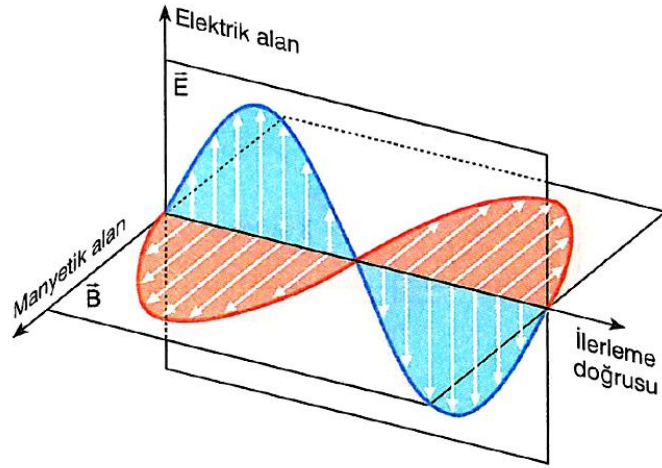
Güneş enerjisi, güneşte meydana gelen nükleer füzyonla oluşur. Füzyon, güneşin çekirdeğinde hidrojen atomlarının protonlarının şiddetli bir şekilde çarpışması ve bir helyum atomu oluşturmak üzere birleşmesiyle gerçekleşir. Bu süreç, PP (proton-proton) zincir reaksiyonu olarak bilinir ve muazzam miktarda enerji yaymaktadır. Güneş, çekirdeğinde her saniye yaklaşık 620 milyon metrik ton hidrojeni eritmektedir. PP zincir reaksiyonu, güneşimiz gibi diğer büyük yıldızlarda da gerçekleşir ve onlara sürekli enerji ve ısı sağlar. Bu yıldızların sıcaklığı Kelvin ölçeğine göre yaklaşık 4 milyon derecedir (Http-3).

Atmosfere girdikten sonra gelen radyasyonun bir kısmı saçılıp yön değiştirirken bir kısmı da havadaki moleküller tarafından soğurularak enerji kaybına uğrar. Solar radyasyonun yüzeye düşmesi, yansıma veya saçılma olmadan doğrudan (direkt) radyasyon olarak adlandırılır. Saçıldıktan sonra yüzeye gelen radyasyona ise yaygın (diffuse) radyasyon denir. Yüzeye gelen doğrudan ve yayılan radyasyonun toplamı global solar radyasyondur (total solar irradiation). Bir yüzeyden tüm yönlerde yansıyan veya saçılan solar radyasyonun yüzeye gelen toplam radyasyona oranı ise albedo olarak adlandırılır (Ineichen vd., 1990).

2.2. Elektromanyetik Radyasyon

Elektromanyetik spektrum, insan gözünün göremediği ışık türlerini de içeren tüm ışık türlerini tanımlar. Evrendeki ışığın büyük bir kısmı aslında gözle görülememektedir. Görebildiğimiz renklerle oluşan gökkuşağı, elektromanyetik spektrumun sadece çok küçük bir bölümünü temsil eder. Diğer ışık türleri arasında mikrodalgalar, radyo dalgaları, ultraviyole ışınlar, kızılötesi radyasyon, X ışınları ve gama ışınları bulunur ve bunlar insan gözüyle algılanamaz (Güler ve Çobanoğlu, 1994)

Elektromanyetik spektrumun bir tarafında dalga boyları en büyük, enerjileri ve frekansları ise en küçük olan radyo dalgaları bulunur. Diğer tarafında ise; dalga boyları çok küçük, enerji ve frekansları büyük olan X ve γ ışınları bulunur. Elektromanyetik radyasyon fotonlardan meydana gelmektedir. Bir foton ise titreşim içerisinde olan bir elektrik alan (E) bir manyetik alan (M) bileşeninden oluşur. Fotonlar, elektrik ve manyetik alanların salınımlarından oluşan enerji paketleridir. Bu salınımlar, fotonun hareket yönüne dik açıdadır ve saniyede gerçekleşen titreşimlerin sayısı ile ifade edilen frekans ile karakterize edilir. Frekans Hertz (Hz) birimi ile ölçülür. Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, bir fotonun elektrikselsel ve manyetik alan bileşenleri birbirine diktir ve eş zamanlı olarak salınım yaparlar. Bu salınımlar, elektromanyetik dalgaların oluşmasını sağlamaktadır (Http-4).



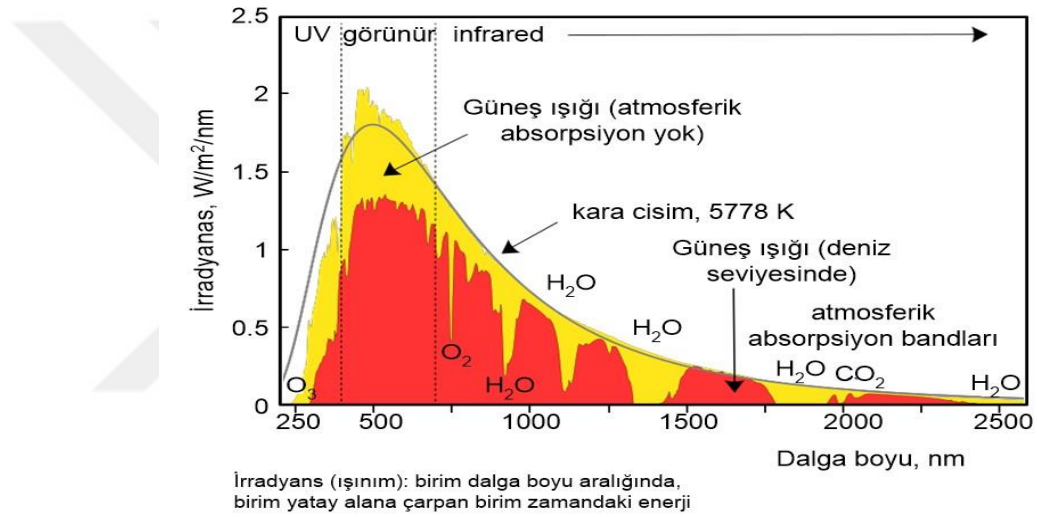
Şekil 2.1. Elektromanyetik dalgalar (Http-5)

Herhangi bir maddenin sıcaklığının olması, onun atomik yapısına bağlı olarak farklı dalga boylarında elektromanyetik radyasyon yayması anlamı taşır. İnsan gözü, elektromanyetik spektrumun belirli bir dalga boyu aralığını yani görünür bölge olarak adlandırılan aralığı algılayabilir. Bu dalga boyu aralığı, yaklaşık 380 nanometre (nm) ile 700 nm arasında değişmektedir. Bu aralıktaki dalga boylarına sahip ışınlar, farklı renkler olarak algılanır. Ancak, kızılötesi dalga boyu aralığında yayılan radyasyonlar insan gözü tarafından görülemez (Http-6). Tablo 2.1'de Dünya yüzeyine ulaşan solar radyasyonun ana spektral dalga boylarının çeşitliliği gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Spektral bölgeler ve dalga boyları aralığı (Ruşen, 2013)

Spektral Bölgeler	Dalga Boyu Aralığı	Yüzde
Mor Ötesi	315- 380 nm	~ %7
Görünür Bölge	380-700 nm	~ %47
Kızıl Ötesi	>700 nm	~ %46

Tablo 2.1., Dünya'ya gelen solar radyasyon için ana spektral dalga boylarını göstermektedir ve Şekil 2.2, deniz seviyesinde solar radyasyonu doğrudan dünya dışı solar radyasyon ve kara cisim spektrumuyla karşılaştırmaktadır.



Şekil 2.2. Solar radyasyon spektrumu (Http-7)

2.3. Güneş Açıları

Birim yüzeye gelen solar radyasyon değerinin hesaplanması için güneşle doğrudan ve dolaylı olarak ilgili olan bazı açıların bilinmesi gerekmektedir.

Enlem açısı (Ø): Ekvator'a olan açısal uzaklığınızı gösteren bir ölçüdür. Bu açı, Dünya'nın merkezine göre hesaplanır ve Güney Yarım Küre'de eksi (-) değerler, Kuzey Yarım Küre'de ise artı (+) değerler alır. Enlem açısı, -90° ile +90° arasında değişkenlik gösterir (Hu vd., 2013).

Saat Açısı (ω): Güneş'in gökyüzündeki konumunu derece cinsinden ölçen bir sistemdir. Bu sistemde, Güneş öğle vakti 0° açıındayken, sabah saatlerinde negatif (-) değerler, öğleden sonra ise pozitif (+) değerler alınır. Öğle vaktinden sonraki zamanı her

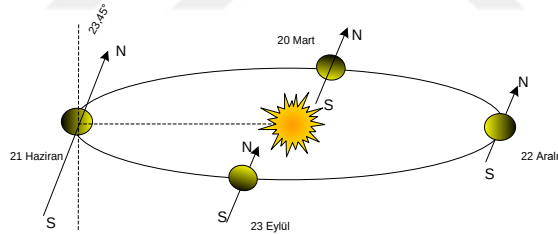
dört dakikada 1° veya saatte 15° cinsinden ölçer. Bu nedenle öğle vaktinden iki saat önce saat açısı -30° , öğle vaktinden iki saat sonra ise $+30^\circ$ dir (Duffie ve Beckmann, 2013).

Sapma açısı (δ): Güneş'in gökyüzündeki konumunu Ekvator düzlemine göre açıklık açısı olarak tanımlanır. Bu açı, Güneş'in doğrultusu ile Ekvator düzlemi arasındaki açıyı ifade eder. Sapma açısı, söz konusu noktadan geçen saat dairesi boyunca ekvatorun kuzeyinde pozitif, güneyinde negatif ölçülür (Yenisey, 2015).

Deklasyon açısı, $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ değer aralığında değişkenlik göstermektedir (Duffie ve Beckman, 1991). Sapma açısının değişimi 24 saat boyunca $0,5^\circ$ den daha düşük bir derece olduğu için 1 gün boyunca sapma açısı sabit kabul edilir (Uyarel ve Öz, 1987). Deklasyon açısı yıl boyunca yavaşça değişir ve bu değişim mevsimlerin oluşmasına katkıda bulunur. Deklasyon açısının alabileceği değerler;

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) (^\circ) \quad (2.1)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. n; 1 Ocak itibarıyla yıl içerisindeki gün sayısını göstermektedir. Deklasyon açısının değişimi Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yılın farklı zamanlarında dünyanın yörüngesi ve deklasyonu

Yükseklik açısı (α): Güneş ışınları ile yatay düzlem arasındaki açıyı ifade eden bir ölçüdür. Bu açı, Güneş'in ufuk çizgisinin üzerinde ne kadar yüksekte olduğunu gösterir. Bu açı güneş ışınlarının yerdeki bir noktaya ne kadar dik açıyla geldiğini ve dolayısıyla ne kadar güneş ışığı aldığını belirler. Yükseklik açısı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad (2.2)$$

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos h \quad (2.3)$$

Formülde L, dünyanın merkezinden bulunan bölgeye kadar olan bir çizgi ile ekvator düzlemi arasındaki açı olarak tanımlanan yerel enlem değeridir (Letcher, 2022).

2.4. Solar Radyasyon

Güneş, atmosferde bulutlar veya gaz molekülleri tarafından emilen kısa dalga radyasyonu olarak enerji yayar, bu da solar radyasyonun atmosferde zayıflamasına neden olur. Güneş ışınımı atmosferden geçtikten sonra yüzeye ulaşır ve yansıtılır veya emilir. Gökyüzünün bulutluluk durumuna göre yaygın solar radyasyon değerlerinde değişkenlik söz konusu olmaktadır. Bulutlu bir gökyüzünde yaygın güneş radyasyonu değeri genellikle yüksekken, açık gökyüzü koşullarında bu değerler daha düşüktür (Muneer, 2007).

Güneş enerjisi, dünyamızı canlı ve yaşanabilir kılan en önemli enerji kaynaklarından biridir. Atmosferik ve klimatolojik süreçleri etkilemesinin yanı sıra, fotosentez, Dünya'nın sıcaklığının korunması ve rüzgâr oluşumu gibi temel olaylar için de gereklidir. Güneş enerjisinin önemini anlamak ve bu kaynağı sürdürülebilir bir şekilde kullanmak, gezegenimizin geleceği için kritik önem taşımaktadır. Yere ulaşabilen solar radyasyon miktarı, deniz seviyesinden itibaren yüksekliğin artmasına paralel olarak artar. Yükseklik arttıkça yutucu parametrelerin (oksijen ve ozon molekülleri) etkisi azaldığından dolayı yere ulaşan radyasyon miktarı da buna bağlı olarak artar. Yapılan çalışmalarda her 1 kilometrelik yüksekliğin solar radyasyon miktarında ortalama %10 civarında bir artışa neden olduğu belirlenmiştir (Http-8).

Solar radyasyon bileşenleri yeryüzüne ulaşma şekline bağlı olarak doğrudan ve yaygın olmak üzere ikiye ayrılır.

Doğrudan (beam) solar radyasyon (Hbeam): Güneş'ten gelen radyasyon, Dünya'ya ulaşmadan önce atmosferden geçer. Bu süreçte, atmosferdeki gazlar, toz ve su buharı gibi çeşitli bileşenler güneş ışınlarını filtreler ve yönünü değiştirir. Atmosferdeki engellere takılmadan doğrudan Dünya'ya ulaşan Güneş radyasyonuna doğrudan solar radyasyon denir (Özdemir, 2012).

Yaygın (Diffuse) solar radyasyon (Hdiffuse): Güneş'ten gelen radyasyon, Dünya'ya ulaşmadan önce atmosferden geçer ve bu yolculuk sırasında birçok etkileşime girer. Atmosferdeki çeşitli bileşenler, solar radyasyonu farklı şekillerde etkiler. Bu etkileşimlerden biri de yaygın solar radyasyon olarak bilinen bir olgudur. Yaygın solar radyasyon Güneş'ten gelen radyasyonun, bu etkileşimler sonucu saçınım gösterdikten sonra yer yüzüne ulaşabilen kısmına denir (Özdemir, 2012).

Global (Küresel) solar radyasyonu (H): Güneş'ten gelen tüm radyasyonun yatay bir yüzeye ne kadar enerji taşıdığını gösteren bir kavramdır (Özdemir, 2012).

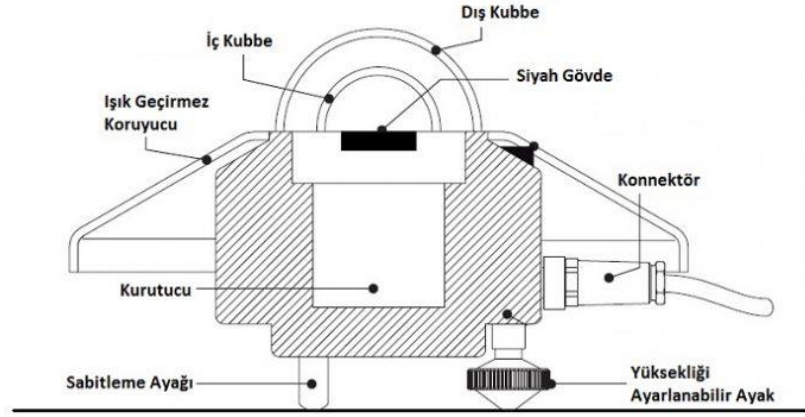
2.5. Solar Radyasyonun Ölçülmesi

Solar radyasyonu ölçümü temelde yersel ölçümler ve uydu tabanlı ölçümler olmak üzere ikiye ayrılır. Yersel ölçümlerde meteorolojik istasyonlarda bulunan aletler sayesinde ölçüm yapılırken, uydu tabanlı ölçümlerde üç farklı metot kullanılır. Bunlar fiziksel (dinamik), istatistiksel ve melez modellerdir. Bu bölümde; bahsedilen solar radyasyon ölçüm yöntemleri hakkında ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

2.5.1. Yersel Ölçümler

Solar radyasyonu ölçmek için iki farklı alet kullanılır. Bunlar piranometre ve pirheliyometredir.

Piranometre (pyranometer) güneş enerjisi alanında yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Global solar radyasyon olarak adlandırılan, yatay bir yüzeye gelen solar radyasyon miktarını ölçmek için kullanılır. Genel olarak piranometre, 180 derecelik bir alanda normalde düz bir yüzey üzerindeki güneş ışıınımını ölçen bir cihazdır (Martínez et al., 2009). Piranometreler herhangi bir yatay yüzeye gelen toplam radyasyonu ölçebilmek için yüzeye yatay olarak yerleştirilmektedirler. Bu sensör, güneş ışınlarının enerjisini elektrik sinyallerine dönüştürür. Bu sinyaller daha sonra bir ölçüm cihazına iletilerek global solar radyasyon değeri hesaplanır. Piranometreler kullanımının kolay olmasıyla birlikte sağlam ve dayanıklı bir yapıya sahiptir ve elektromanyetik spektrumun tüm dalga boylarını ölçebilir. Bu avantajlarla birlikte doğrudan güneş ışıınımı ve gölgeli alanlar arasındaki farkı ayırt edememesi, sıcaklık değişimlerinden etkilenmesi ve belli aralıklarla kalibrasyona ihtiyaç duyması gibi dezavantajları vardır (Http-9). Piyasadaki diğer isimleri pyranometer, payronometre ya da güneş ölçerdir. Şekil 2.4'te piranometrenin iç yapısı, Şekil 2.5'te ise piranometre gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Piranometrenin iç yapısı (Http-10)



Şekil 2.5. Piranometre (Http-11)

Pirheliyometre (pyrheliometer), güneşten gelen ışınların doğrudan gücünü ölçen özel bir cihazdır. Bu cihaz, güneş ışınlarının Dünya'ya ulaşmadan önce atmosferden geçirdiği değişimleri göz ardı ederek, Güneş'ten gelen orijinal enerji miktarını hesaplar. Doğrudan gelen radyasyonunu ölçmek için, ölçüm aletinin yüzeyinin gelen radyasyona dik konumda bulunması gerekmektedir. Pirheliyometre, 5°'lik bir görüş açısına sahiptir. Pirheliyometreler termopilleri içeren ışıyım sensörleridir (Duffie vd., 2020). Pirheliyometreler, solar radyasyon potansiyelini değerlendirmek ve solar radyasyonun Dünya'ya etkilerini anlamak için önemli bir araçtır. Bu cihazlar sayesinde güneş enerjisi santrallerinin verimliliği optimize edilebilir ve güneş ışıyımı ile ilgili doğru ve güncel bilgiler elde edilebilir. Pahalı ve hassas olmaları, doğrudan güneş ışığına ihtiyaç duydukları için bulutlu havalarda kullanılmaz durumda olmaları ve düzenli olarak kalibre edilmeye ihtiyaç duymaları bu cihazların dezavantajlarıdır. Bir pirheliyometre üzerindeki

pencere, dalga boyları yaklaşık 200 nm ile yaklaşık 4000 nm arasında olan solar radyasyonu ileten bir filtre görevi görür ancak dalga boyları 4 μm 'den uzun olan termal radyasyonu engeller. Şekil 2.6'da pirheliyometre gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Pirheliyometre (Http-12)

2.5.2. Uydu Tabanlı Ölçümler

Günümüzde solar radyasyon miktarını modellemek için uydular aktif olarak kullanılmaktadır. Uydu tabanlı tahminlerde, yüksek zamansal ve konumsal çözünürlüklere sahip verilere rahatlıkla ulaşım sağlanmaktadır. Uydu tabanlı solar radyasyon modelleri üç başlık altında toplanır. Bunlar; fiziksel (dinamik), istatistiksel ve melez modellerdir (Özdemir, 2012).

Fiziksel modeller, radyasyon transfer denklemleri adı verilen matematiksel formülleri kullanarak yatay bir yüzeye ne kadar solar radyasyon ulaştığını hesaplar. Bu modeller, atmosferdeki gazlar, toz ve su buharı gibi unsurların solar radyasyonu nasıl etkilediğini de göz önünde bulundurur. Gautier vd. (1980) tarafından geliştirilen model, uydu tabanlı fiziksel modeller arasında en çok bilinen modellerden biridir. Bu model, enerjinin korunumu ilkesine dayanarak, Güneş'ten atmosfere giren ve Dünya'ya ulaşan enerji miktarının aynı olduğunu varsayar. Model, iki ana bileşenden oluşur. Bunlar açık ve bulutlu hava yaklaşımlarıdır. Açık hava yaklaşımı, bulutsuz havalarda solar radyasyonun atmosferden nasıl geçtiğini ve yatay bir yüzeye ne kadar radyasyon ulaştırdığını hesaplar. Bulutlu hava yaklaşımı ise bulutlu havalarda solar radyasyonun bulutlar tarafından nasıl saçıldığını ve emildiğini ve yatay bir yüzeye ne kadar solar radyasyon ulaştığını hesaplar. Atmosfere ulaşan radyasyon, atmosfer içerisinde

yansımayla ve soğurmaya maruz kalarak yüzeye ulaşır. Çalışma prensibi radyasyon transfer denklemleri kullanılarak, uydu alıcısına gelen radyasyonun, atmosferin tepe noktasında yatay bir yüzeye ne kadar radyasyon ulaştığının hesaplanmasına dayanır (Yu vd., 2022).

İstatistiksel modeller, solar radyasyonun yatay bir yüzeye ne kadar ulaştığını tahmin etmek için uydu verileri ve yer ölçümleri arasındaki ilişkiyi kullanır. Bu modeller, bulutların güneş ışınlarını nasıl etkilediğini de göz önünde bulundurur. Bu modeller içinde en çok bilinen model Cano vd. (1986) tarafından önerilen modeldir. Uydu tabanlı istatistiksel modeller de iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama bulut indeksinin belirlenmesidir. Uydu görüntülerinden bulutların ne kadar yer kapladığı belirlenir. Bu işlem için üç farklı sınıf kullanılır. Bunlar açık hava, yarı bulutlu hava ve bulutlu havadır. İkinci aşamada solar radyasyon tahmini yapılır. Bunun için bulut indeksi ve yer ölçümleri kullanılarak, regresyon denklemleri adı verilen matematiksel formüller ile solar radyasyonun ne kadar olacağı tahmin edilir.

Uydu tabanlı modellerde, Heliosat modeli en çok tanınan ve kullanılan melez modellerden biridir. Bu model, Meteosat adlı meteorolojik uydulardan gelen görüntüler aracılığıyla solar radyasyon haritaları oluşturmak için geliştirilmiştir. Heliosat, hem ampirik fiziksel hem de istatistiksel yöntemler kullanarak, bulutların solar radyasyonu nasıl etkilediğini ve yeryüzüne ne kadar solar radyasyon ulaştığını hesaplar. Heliosat modeli ilk olarak Cano vd. (1986) tarafından geliştirilmiştir. 1996 yılında ise bulut indeksi ve açık gökyüzü radyasyon parametreleri eklenerek model daha da geliştirilmiştir. Bu sayede modelin doğruluğu ve kullanılabilirliği önemli ölçüde artmıştır (Http-13).

Heliosat yönteminin temel fikri, bir alan üzerindeki global solar radyasyon miktarının istatistiksel olarak bulut örtüsüyle ilişkili olmasıdır. Yöntemde öncelikli olarak açık hava için difüz ve direkt bileşenleri ayrı ayrı hesaplanıp bununla birlikte global solar radyasyon değişkeni hesaplanır ve bulut değişkeniyle ilişkilendirilir. Uydu verileri 15 dakikada bir güncellenmekte olup bu verilerin işlenmesiyle elde edilen değerlerden bulut indeksine geçiş yapılır. Bu değerler açık hava solar radyasyon değerleri ile işlenmekte ve işlem sonucunda solar radyasyon değerleri elde edilmektedir. Çalışma prensibi bir radyasyon transfer denkleminin analizi ve basit istatistiksel ilişkilerdir. Modelde öncelikli olarak açık hava için doğrudan ve difüz bileşenlerin ayrı ayrı hesaplanıp bununla birlikte global solar radyasyon değişkeni hesaplanmaktadır. Temin edilen uydu verileri

kullanılarak ilk aşamada elde edilen global solar radyasyon değerleri bulut değişkenine (parametre) göre düzenlenmektedir(Demirgöl vd., 2023).

2.5.2.1. *SYM tabanlı modeller*

Bu bölümde ele alınan dört solar radyasyon modeli, üç temel yaklaşım içermektedir. Solar Analiz, gökyüzünü zenit ve azimut koordinatlarıyla tanımlayarak geometrik bir metot kullanır. Atmosferik zayıflama, doğrudan atmosferik geçirgenlik ve yaygın radyasyon oranını göz önünde bulundurur. SRAD, daha önce elde edilen tahminleri ayarlamak için aylık ortalama parametreleri (örneğin atmosferik geçirgenlik veya güneş ışığı oranı) kullanır. r.sun ve Solei-32 modelleri, Linke'nin bulanıklık katsayısı kullanarak atmosferik zayıflamayı hesaplarlar ve solar radyasyonun yeryüzüne ne kadar ulaştığını hesaplamak için matematiksel formüller kullanırlar (Http-14).

SYM tabanlı ölçümlerde, yüzeydeki solar radyasyonu tahmin etmek için noktaya özgü ve alan bazlı modeller olmak iki tür model vardır. Noktaya özgü modeller, yüzeyin geometrisine, belirli bir noktadan görünen gökyüzüne ve Güneş'in gerçek konumuna dayalı olarak bir konum için solar radyasyonu hesaplar. Noktaya özgü modeller belirli bir konum için oldukça doğru olabilir ancak bir alan için yetersizdir (Fu & Rich, 2000). Çünkü her nokta Güneş'in yörüngesine göre farklı bir konuma sahiptir ve farklı konumlar da farklı yapay ufuklara karşılık gelmektedir. Buna karşılık alan bazlı modeller coğrafi bir alan için güneşlenmeyi, yüzey yönelimini ve gölge etkilerini SYM verisi üzerinden hesaplar(Dubayah ve Rich, 1996; Dubayah ve Rich, 1995; Gaukler vd., 2018).

Solar Analiz hem noktaya özgü hem de alan bazlı modelleri en doğru şekilde kullanır. Solar Analiz, Windows ortamında çalışan bir ArcView v3.x uzantısıdır. Bu araç, bir coğrafi konumda solar radyasyon miktarını hesaplamak için enlemi, topografyayı, gölge atımını ve atmosferik zayıflamayı dikkate alır. Global, doğrudan ve yaygın radyasyonun yanı sıra güneş haritası, doğrudan ışıınım süresi, gökyüzü haritası ve görünüm haritası gibi çıktılar sağlar. Solar Analiz 'in ilk adımı, her bir konum için yukarı doğru bakan bir yarım küre görüş alanı oluşturmaktır. Her bir gökyüzü yönünden gelen doğrudan solar radyasyon miktarı, bu yarım küre projeksiyonunda bir güneş haritası oluşturularak gösterilir. Güneşin görünen konumu zamanla değiştiğinde, bu haritalar güneşin ayrı gökyüzü parçalarına göre konumunu haritalandırır. Toplam doğrudan güneşlenme, görüş alanı tarafından engellenmeyen veya kısmen engellenmeyen tüm güneş haritası parçalarından gelen doğrudan solar radyasyonun toplamıdır. Yaygın solar

radasyon ise herhangi bir gökyüzü yönünden kaynaklanabilir ve tüm gökyüzü haritası parçalarından gelen yaygın solar radyasyonun toplamını ifade eder. Solar analiz, gökyüzünü zenit ve azimut koordinatlarıyla tanımlayarak farklı gökyüzü parçalarına ayırır. Her bir parça, belirli bir gökyüzü şemasına göre benzersiz bir değer alır. Bu gökyüzü haritası, bir raster haritadır. Toplam yaygın solar radyasyon, görüş alanı tarafından engellenmeyen veya kısmen engellenmeyen tüm gökyüzü haritaları parçalarından gelen solar radyasyon miktarının toplamını ifade eder. Global solar radyasyon ise doğrudan ve yaygın solar radyasyonun toplamı olarak hesaplanır. Bu hesaplamalar yüzeydeki her konum için tekrarlanır ve böylece topografik yüzeydeki tüm noktalar için güneşlenme haritaları oluşturulur. Yöntem bölümünde bu araç daha ayrıntılı olarak anlatılmıştır (Tovar Pescador ve Pozo-Vázquez, 2006).

r.sun, GRASS GIS'in açık kaynak ortamında geliştirilmiş bir modüldür. r.sun'un ilk versiyonu, Su'ri ve Hofierka (2004) tarafından Avrupa Solar Radyasyon Atlası (ESRA) içinde geliştirilen algoritmaları kullanarak, açık gökyüzü koşulları için solar radyasyonun üç bileşenini (doğrudan, yaygın, yansıyan) önemli ölçüde yeniden tasarlamıştır. Bulutlu havalarda, bulut zayıflatma faktörünün de dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Model ayrıca arazi etkilerini hesaba katar ve böylece solar radyasyonun mekansal değişimini de hesaplar (Hofierka ve Šúri, 2002). Model, açık gökyüzü atmosferi için, Rayleigh optik kalınlığı (dR) ve göreceli optik hava kütlesi (m) gibi gaz bileşenleri tarafından belirlenen zayıflatmayı tanımlar. Linke'nin bulanıklığı (TL), katı ve sıvı partiküllerin neden olduğu zayıflatmayı, coğrafi konum, zaman ve yükseklikle değişen bir şekilde tanımlar. Bulutlu koşullar, global radyasyon üzerinde güçlü zayıflatmalara sebebiyet verir ve bu tür durumlar için model herhangi bir girdi parametresi sağlamaz; bu nedenle ampirik bir yaklaşım gereklidir. Eğimli bir yüzey üzerindeki açık gökyüzü yaygın solar radyasyon miktarını tahmin etmek için kullanılan bu model, güneşli, kısmen güneşli ve gölgeli yüzeyler arasında ayırım yaparak, yatay bir yüzey üzerindeki yaygın bileşenden hesaplanır. Yerden yansıyan açık gökyüzü ışıınımı, izotropik bir varsayıma dayanarak ele alınır. Bu, ışıının her yönde eşit olarak dağıldığı anlamına gelir. Global yatay ışıınım ise, doğrudan ve yaygın bileşenlerin toplamı olarak ifade edilir. Bu ışıınım, ortalama zemin albedosu ve eğimli bir yüzey tarafından görülen zeminin oranı ile orantılıdır (Hofierka, 2002; Šúri ve Hofierka, 2004). Bu model, USC CBS Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilmiş olan TAPES-G (Çevre Bilimleri için Arazi Analiz Programları) programının bir parçası olarak ücretsiz olarak sunulmaktadır

((Http-15). UNIX ortamında kullanılabilir, ancak en son sürümleri Windows platformlarında ArcGIS9.x coğrafi işleme çerçevesi içinde çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Model, kısa ve uzun dalga bileşenlerini, net ışıınımı, yüzey ve hava sıcaklıklarını içeren tam radyasyon hesaplamaları sağlar. Model, potansiyel solar radyasyonu (hem kısa dalga hem de uzun dalga radyasyon) enlem, eğim, bakı, topografik gölgeleme ve zaman gibi faktörlere bağlı olarak hesaplar. Daha sonra bu tahmini, aylık ortalama bulutluluk ve güneş ışığı saatleri hakkındaki bilgilerle günceller. Kısa ve uzun dalga radyasyon akıları, 1 gün ile 1 yıl arasında değişebilen, kullanıcı tarafından belirlenen süre boyunca her bir grid noktasında solar radyasyon miktarını tahmin etmek için kullanılır (Wilson ve Gallant, 2000).

SRAD'de kısa dalga radyasyonunun hesaplanması dört aşamaya ayrılmıştır. İlk olarak, yatay dünya dışı radyasyon hesaplanır. İkinci aşamada, SYM'nin her hücresi için gün doğumundan gün batımına kadar, öğlen saatlerine simetrik olarak 12 dakikalık aralıklarla farklı açık gökyüzü anlık kısa dalga akıları elde edilir. Bu yöntem, Fleming (1987)'in çalışmasına dayanarak, SRAD'ın hedeflendiği hidrolojik, jeo-morfolojik ve ekolojik uygulamaların çoğu için yeterince doğru günlük tahminler sağladığı sonucuna varmıştır. Üçüncü aşamada, bu akılar günlük toplamaları elde etmek için entegre edilir ve bulutluluğun etkileri dikkate alınarak ayarlanır. Son olarak, dördüncü aşamada, kullanıcı tarafından belirtilen süre boyunca günlük değerlerin ortalaması alınır.

SOLEI-32 modeli Slovak Bilim Akademisi Hidroloji Enstitüsünde (<http://www.ih.savba.sk>) geliştirilmiş bir solar radyasyon modelidir. Model isteğe bağlı olarak arazi örtüsü, zemin albedosu ve meteorolojik veriler gibi farklı parametreleri kullanarak güneş ışıınlarının yeryüzüne ne kadar ulaştığını hesaplar. Meteorolojik veriler, çalışma alanındaki kontrol bölgeleri için bağlı güneş ışığı, sıcaklık, rüzgâr, bağlı hava nemi ve buhar basıncı değerlerini içeren bir dosyadan oluşur. İlk olarak, modelde her hücre için her zaman adımında topografik özellikleri ve güneş ışığı süresi belirlenir. Daha sonra, eğimli yüzeye gelen potansiyel solar radyasyonun tahmini, doğrudan, yaygın ve yansıyan bileşenlerin toplamı olarak yapılır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışma alanına ilişkin genel bilgilere, çalışmada kullanılan materyale ve SYM tabanlı solar radyasyonun hesaplanmasında ve haritalandırılmasında kullanılan yöntemlere ilişkin açıklamalar verilmiştir.

3.1. Çalışma Alanı

Yüksek lisans tezinin çalışma alanı Eskişehir ilini kapsamaktadır. Çalışma alanı, 29°-32° doğu boylamları ile 39°-40° kuzey enlemleri arasında yer almakta olup yüzölçümü 13562 km²'dir. Eskişehir, İç Anadolu Bölgesi'nin kuzeybatısında yer almakta olup il merkezi, kuzeyinde Mihalgazi ve Sarıcakaya, doğusunda Alpu, Mihaliççık ve Ankara, güneyinde Mahmudiye, Seyitgazi ve Afyon, batısında ise İnönü ve Kütahya ile çevrilidir (Http-16).

Şehrin iklimi İç Anadolu Bölgesi tipi karasal iklimdir. Kışları soğuk ve kar yağışlı, yazlar sıcak ve yağışsızdır. Yaklaşık % 22'sini dağların oluşturduğu ilin, yeryüzü şekilleri içinde ovaların payı %26 dolaylarındadır. İç Anadolu'nun kuzeybatı köşesinde yer alan Eskişehir ilinin topografik yapısını, Sakarya ve Porsuk havzalarındaki düzlükler ile bunları çevreleyen dağlar oluşturur (Http-16).

Eskişehir ilinde işletmeye açılmış 8 adet Güneş Enerji Santrali (GES) bulunmaktadır. Bunlar; Çayören Kinesis GES, Galyum Oraka GES, Enton Beton GES, Günyüzü GES, Söğütlüözü GES, Sarar- Ilgazlar Eskişehir Geri Dönüşüm GES, Tepebaşı Belediyesi GES ve Beylikova Belediyesi GES'dir. Ön lisans alan GES sayısı ise 9 tanedir.

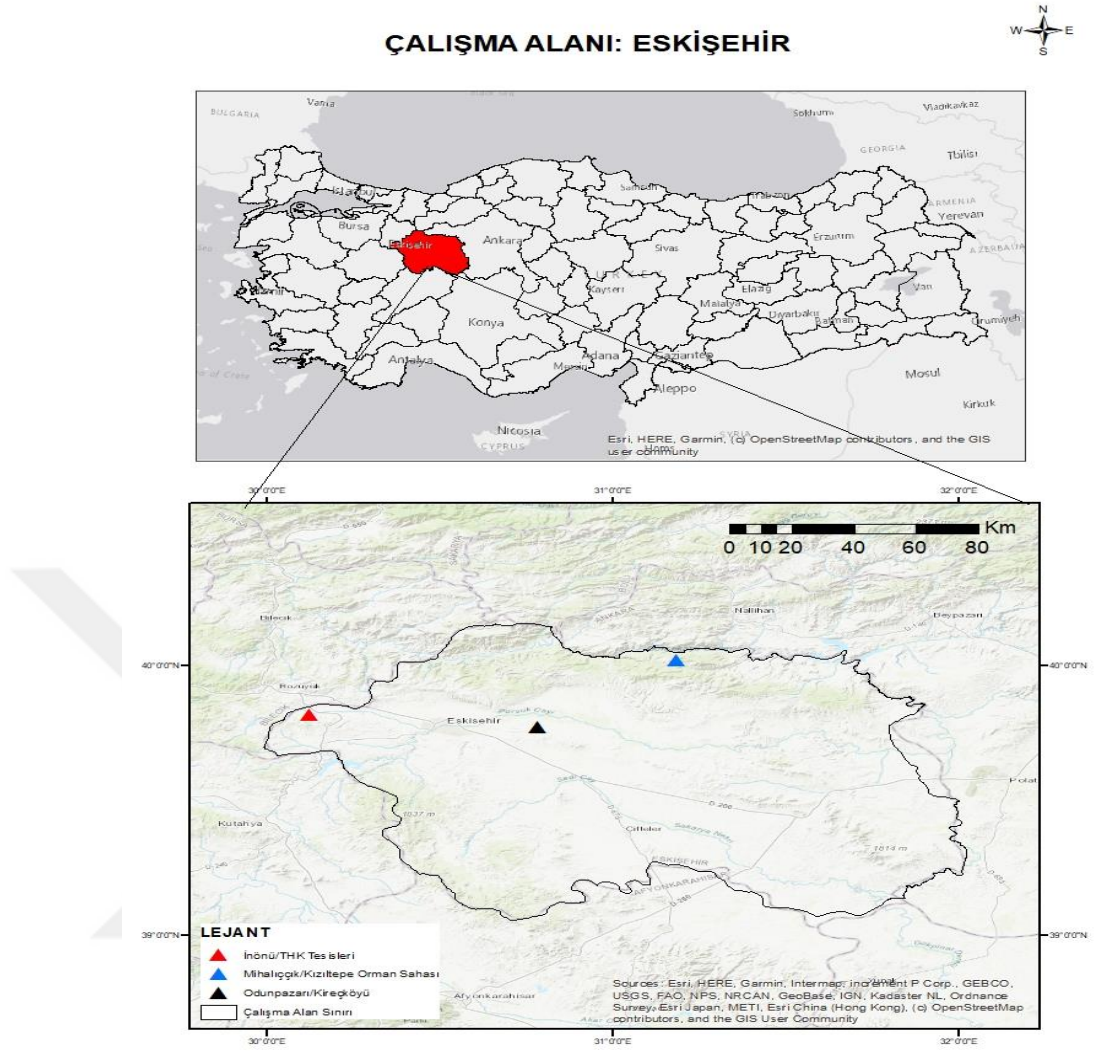
Çalışma alanında halihazırda bekleyen birçok GES projesi bulunmaktadır. Bu projelerin en büyüklerinden biri Sivrihisar ilçesi, Aşağıkepen Mahallesi'ndeki 306 hektarlık arazide 448 bin 803 adet güneş paneli yer alacak olan projedir. Çalışma alanında planlanan bir diğer proje Beylikova ilçesi sınırları içinde kurulacak olan, 40 megawatt (MW) kurulu gücünde Kıran GES ve 40 megawatt saat (MWh) kapasiteli Enerji Depolama Tesisi (EDT)' dir. Bu projede; 40 megawatt elektrik (MWe) kurulu güç ile yılda 80 milyon kilowatt saat (KWh) elektrik enerjisi üretilmesi planlanmıştır. Bir başka proje, Sabancı Holding iştiraki Çimsa tarafından Eskişehir Fabrikası'nda yapılması planlanan GES'dir. Kurulacak santralin, yılda yaklaşık 19 milyon KWh elektrik enerjisi üretmesi planlanmıştır. Santral işletmeye açıldıktan sonra fabrikanın yıllık enerji ihtiyacının yaklaşık yüzde 14'ü yenilenebilir enerji kaynağı ile karşılanıyor olacaktır

(Http-17). Planlanan bir diğer proje; Tüpraş'ın bağlı ortaklığı Entek Elektrik Üretimi Anonim Şirketi tarafından Eskişehir İli, Seyitgazi İlçesi, sınırları içinde 50 MW kurulu gücünde Adatoprakpınar GES ve 50 MWh kapasiteli Elektrik Depolama Tesisi (EDT)'dir. Projenin değeri 510 milyon TL olarak hesaplanmıştır. Proje kapsamında yaklaşık 100 hektarlık alanda her biri 575 Watt peak (Wp) gücünde 86.957 adet panel kurulması planlanmıştır (Http-18).

Çalışma alanında 17 meteorolojik istasyon bulunmasına rağmen sadece 3 tanesinde solar radyasyon ölçümü yapılmaktadır. Bu istasyonlar İnönü, Mihaliççık ve Odunpazarı ilçelerinde yer almaktadır. İnönü ilçesindeki istasyon İnönü/THK Tesisleri istasyonudur ve "39.8284 enlem, "30.1243-30.1250" boylam coğrafi koordinatları arasında yer almaktadır. Mihaliççık ilçesindeki istasyon Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonudur ve "40.0208 enlem, "31.1819-31.1830 " boylam coğrafi koordinatları arasında bulunmaktadır. Odunpazarı ilçesindeki istasyon ise Odunpazarı/Kireçköyü istasyonudur ve "39.772 enlem, "30.7819-30.7820 " boylam coğrafi koordinatları içerisinde yer almaktadır. Çalışma alanında yer alan istasyonlara ait eğim ve bakı bilgisi ve istasyonlar çevresindeki engel durumu Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Çalışma alanını gösteren lokasyon haritası ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. *İstasyonlara ait eğim, bakı ve engel durumu*

İstasyonlar	Eğim (%)	Bakı	Engel Durumu
İnönü/THK Tesisleri	6	Güneydoğu	Engel yok
Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası	6	Kuzey	25 m yakınında tek katlı yapı var.
Odunpazarı/Kireçköyü	20	Kuzeydoğu	Engel yok



3.2. Materyal

Yüksek lisans tezinin amacı ve kapsamına bağlı olarak birçok kaynak, veri ve yazılım incelenmiştir. Bu çerçevede, yararlanılan temel materyal aşağıdakilerden meydana gelmektedir;

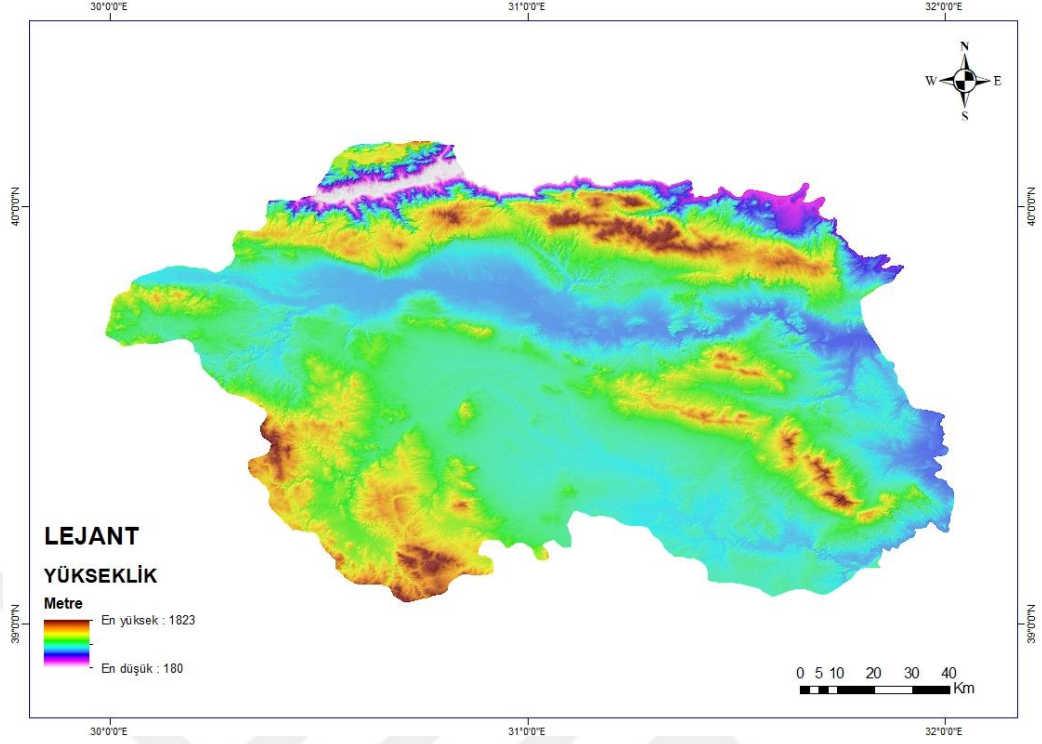
- Çalışma alanı ve konu ile ilgili bilgiler sağlayan uluslararası ve ulusal alanda yazılan makaleler, tezler vb. literatür kaynakları,
- Çalışma alanını içeren farklı çözünürlükte SYM verileri,
- Yapılan analiz ve değerlendirmeler için kullanılan bilgisayar yazılımları,
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü veri arşivinden elde edilen, Eskişehir ili 2022 yılına ait günlük toplam global solar radyasyon değerleri.

- Verilerin depolanması, görüntülenmesi ve değerlendirilmesi için ArcMap 10.8.2 yazılımı kullanılmıştır.

3.2.1. SYM Verileri

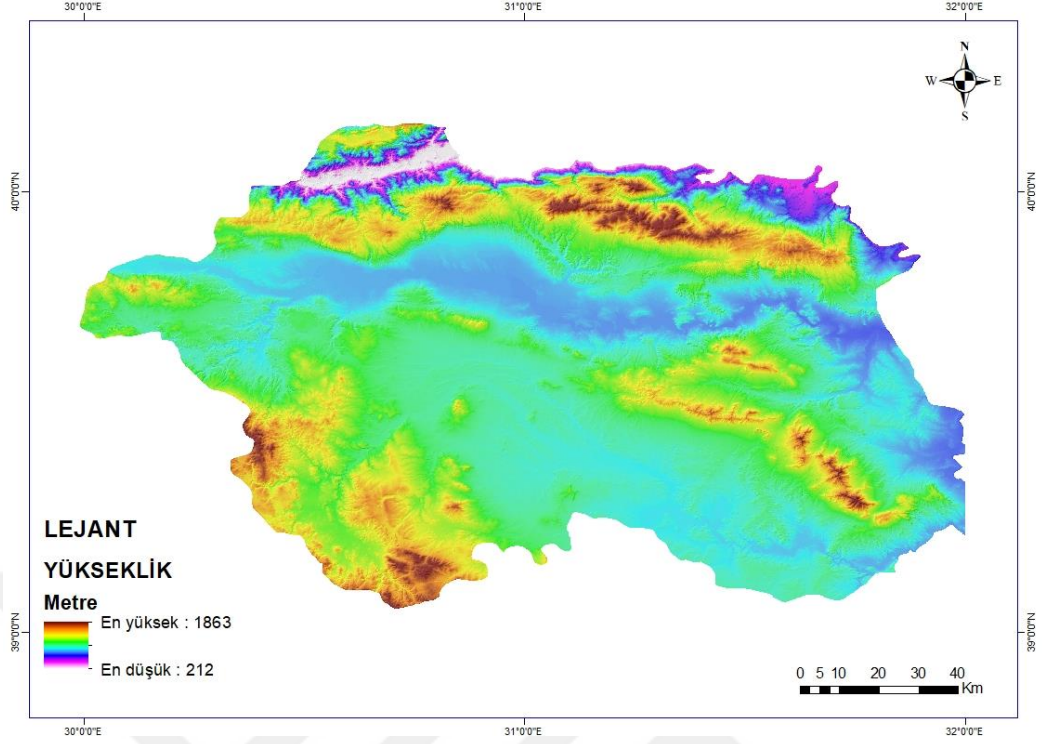
Çalışmanın en önemli materyali SYM veri setleridir. Bu çalışmada 4 farklı SYM verisi kullanılmıştır. Bunlar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), *TANDEM-X* (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements), EU-DEM (European Digital Elevation Model) ve ALOS/PALSAR (Advanced Land Observing Satellite). Bu SYM verileri CBS ortamında çalışmaya hazır hale gelecek şekilde haritalandırılmıştır.

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), NASA tarafından yürütülen ve yeryüzünün topografik haritasını çıkarmayı amaçlayan uluslararası bir projedir. 2000 yılında Endeavour uzay mekiği ile gerçekleştirilen 10 günlük bir uçuş sırasında, $\pm 60^\circ$ enlemleri arasındaki kara parçalarının yükseklik verileri toplanmıştır. Bu veriler, iki radar sensörü kullanılarak tek geçişli InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) tekniği ile elde edilmiştir ve yeryüzünün %80'i için SYM üretilmiştir (Http-19). Veri toplama sürecinde meydana gelen saçılma, yansıma ve gölgelenme gibi olaylar, SYM'lerde kısmi veri kayıplarına yol açmış olup, bu veri noksanlıkları SYM'lerin kullanımını sınırlamıştır. Türkiye'deki SRTM verilerindeki bu boşlukların büyük bir kısmı, Harita Genel Müdürlüğü tarafından üretilen 1:25.000 ölçekli standart topografik haritalarla doldurulmuş ve böylece ülkemiz için sorunsuz bir model oluşturulmuştur. Çalışma alanına ait SRTM SYM verisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışma alanına ait SRTM SYM verisi

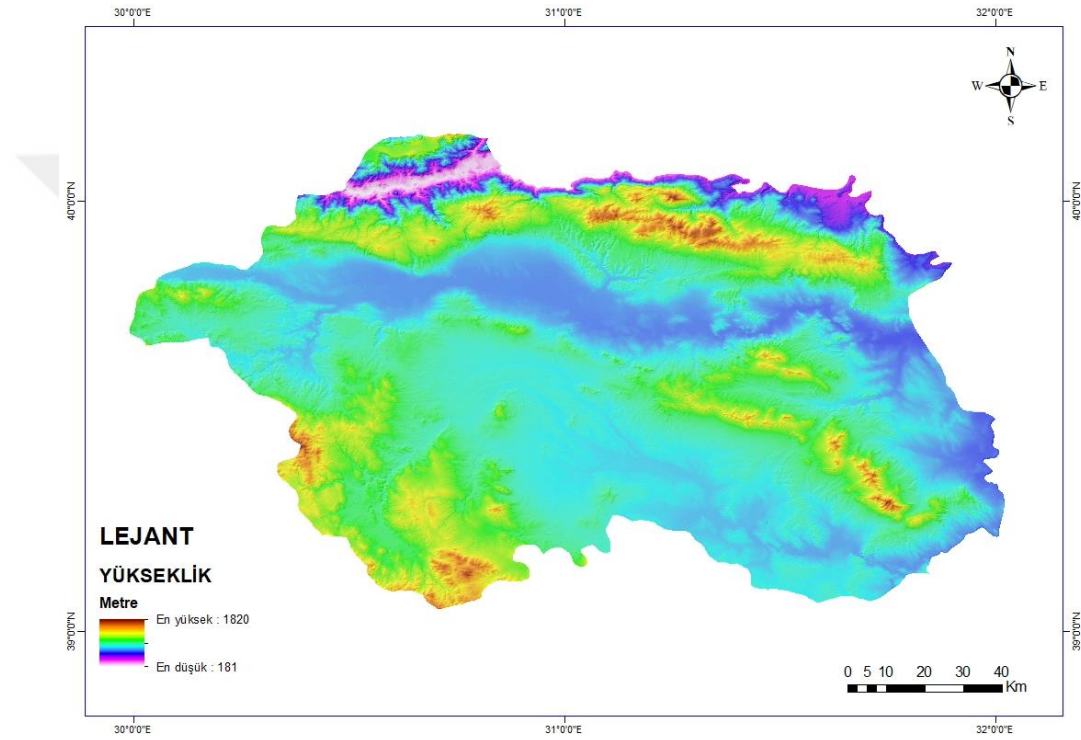
TANDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements) misyonu, mevcut yükseklik modellerinin düşük çözünürlüklü, tutarsız veya eksik olması nedeniyle, Dünya'nın yüksek kalite ve doğrulukta üç boyutlu bir görüntüsünü oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu misyon, Alman Uzay Ajansı (DLR) ve Airbus Defence and Space tarafından ortaklaşa yürütülmektedir. Alman Havacılık ve Uzay Merkezi ile Almanya'nın Friedrichshafen kentinde bulunan Astrium GmbH arasında kamu-özel ortaklığı altında geliştirilen bu proje, TerraSAR-X misyonu gibi, TANDEM-X'i de içermektedir. TANDEM-X, SYM üretmek için TerraSAR-X'e ek olarak tasarlanmış ve bu boşlukları kapatmak amacıyla, birçok bilimsel ve ticari çalışmalar için homojen bir yükseklik modeli sunmayı hedeflemektedir. TerraSAR-X, 2007 yılından beri faaliyet göstermektedir ve 2010 yılında TANDEM-X uydusu da ona katılmıştır. 250-500 metre mesafede uçan bu iki uydu, dünya yüzeyini aynı anda farklı açılardan görüntülemektedir. Bu görüntüler, 12 metre çözünürlüğe ve 2 metreden daha iyi düşey doğruluğa sahiptir (Http-20). Çalışma alanına ait TANDEM-X SYM verisi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışma alanına ait TANDEM-X SYM verisi

EU-DEM, sensörler tarafından aydınlatılan Avrupa düzeyinde bir SYM'dir. Ağırlıklı ortalama yaklaşımıyla birleştirilmiş SRTM ve ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) verilerine dayanan hibrit bir üründür. Coğrafi referans sistemi, enlem/boylam, yatay datum ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), elipsoid GRS80 (Geodetic Reference System 1980) ve dikey datum EVRS2000 (European Vertical Reference Frame 2000) ve jeoid EGG08 (European Gravity and Geoid Project 08)'dir. Bu parçalar daha sonra Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (JRC) tarafından ETRS89-LAEA (Lambert Azimuthal Equal-Area Projection)'ya projelendirilen 5°x5° parçalar halinde bir araya getirilmiştir. EU-DEM v1.0'ın uygulanması, EU GMES (Global Monitoring for Environment and Security) /Copernicus programının Referans Veri Erişimi (RDA) Eylemi çerçevesinde 2009-2011'de Avrupa Komisyonu tarafından koordine edilmiştir. EU-DEM v1.0'ın uygulanması, Avrupa Komisyonu tarafından 2009-2011 yılları arasında EU GMES/Copernicus programının Referans Veri Erişimi (RDA) Eylemi çerçevesinde koordine edilmiştir. EU-DEM v1.0, su ile ilgili detayların yeterince temsil edilmesini ve hidrografi katmanıyla tutarlı olmasını sağlamak için düzenlenmiştir. Tüm EU-DEM verileri, 3D stereo ortamda etkileşimli olarak düzenlenir. Düzenleme

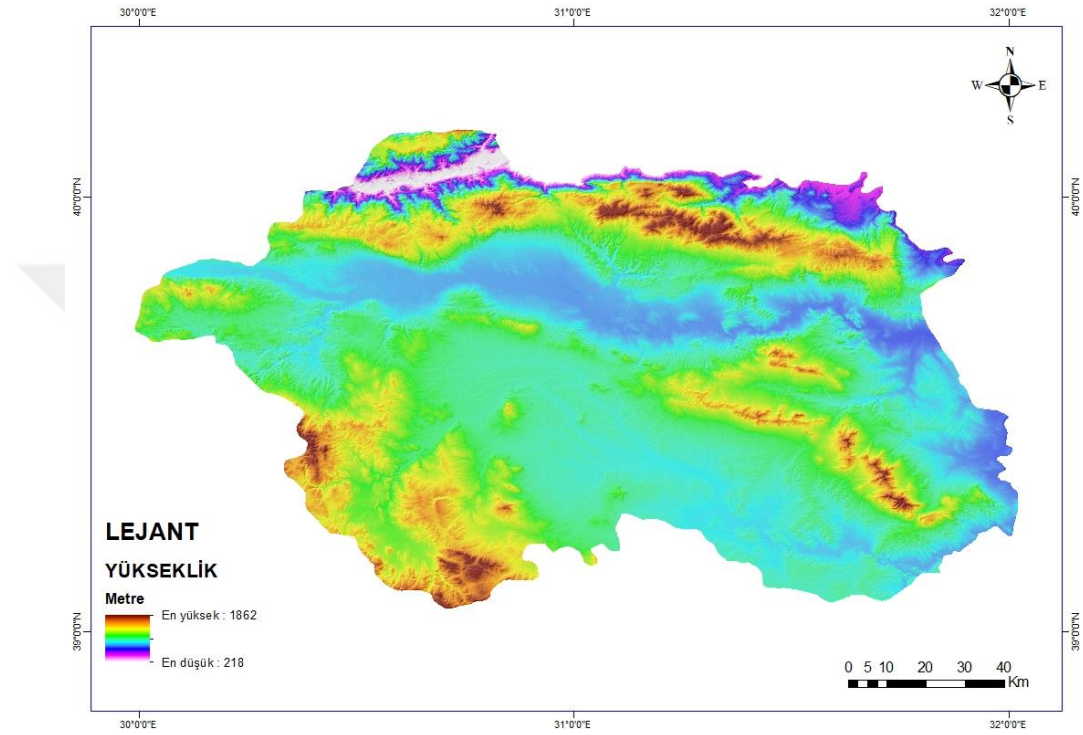
işlemi, hidrografik özelliklerle sınırlıdır ve çukurlar ile tümsekleri içerir. 60° kuzey enleminin üzerindeki bölgelerde, EU-DEM oluşturma süreci, JRC (Joint Research Centre) tarafından sağlanan diğer SYM veri kaynakları ile desteklenmektedir. Hidrografi verilerine göre, su özellikleri düzleştirilmiş (okyanuslar, göller) ve basamaklı (nehirler) olarak sınıflandırılmıştır(Http-21). Çalışma alanına ait EU-DEM SYM verisi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışma alanına ait EUDEM SYM verisi

ALOS/ PALSAR ALOS (üzerinde yer alan PALSAR sensörü ile) güneş senkronlu yörünge içerisinde hareket etmekte olup, her 100 dakikada bir veya günde 14 defa dünya çevresinde dönmektedir. ALOS, her 46 günde bir kendi rotasında dönmekte olup iç yörüngesi ekvatorundan yaklaşık olarak 59,7 km uzaklıkta bulunmaktadır. L-bant frekansını kullanan PALSAR adı verilen aktif bir mikrodalga sensörü, gündüz ve gece gözlemlerinin yanı sıra hava engellerinden arınmış yüksek çözünürlüklü SYM ürünlerinin elde edilmesine büyük ölçüde fayda sağlamaktadır. PALSAR, Japonya'ya ait ikinci bir SAR uydusu olup L-band frekansını kullanmaktadır. Japon Yer Araştırma Uydusu-1 (JERS-1) üzerindeki Sentetik Açıklıklı Radar (SAR)'a kıyasla geliştirilmiş fonksiyonları ve

performansı ile daha üst düzey bir teknoloji sunmaktadır. PALSAR'ın, doğal afetlerin izlenmesi, çevresel etkilerin kontrolü ve kaynak araştırmaları gibi alanlarda büyük katkılar sağlaması beklenmektedir. Çalışma alanına ait ALOS/PALSAR SYM verisi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışma alanına ait ALOS/PALSAR SYM verisi

Tez çalışmasında kullanılan 4 farklı SYM verisine ait konumsal çözünürlük değerlerine ve bu verilerin temin edilmesine ilişkin bilgilere Tablo 3.2'de yer verilmiştir.

Tablo 3.2. SYM verilerine ait konumsal çözünürlük ve kaynak bilgisi

SYM Verisi	Çözünürlüğü (metre)	Kaynağı
ALOS/PALSAR Verisi	12,5	https://asf.alaska.edu/ sitesi
EU-DEM Verisi	25	https://ec.europa.eu/ sitesi
TANDEM-X Verisi	-27	https://data.europa.eu/ sitesi
SRTM Verisi	-28	https://earthexplorer.usgs.gov/ sitesi

3.2.2. Meteorolojik Gözlem İstasyonu Verileri

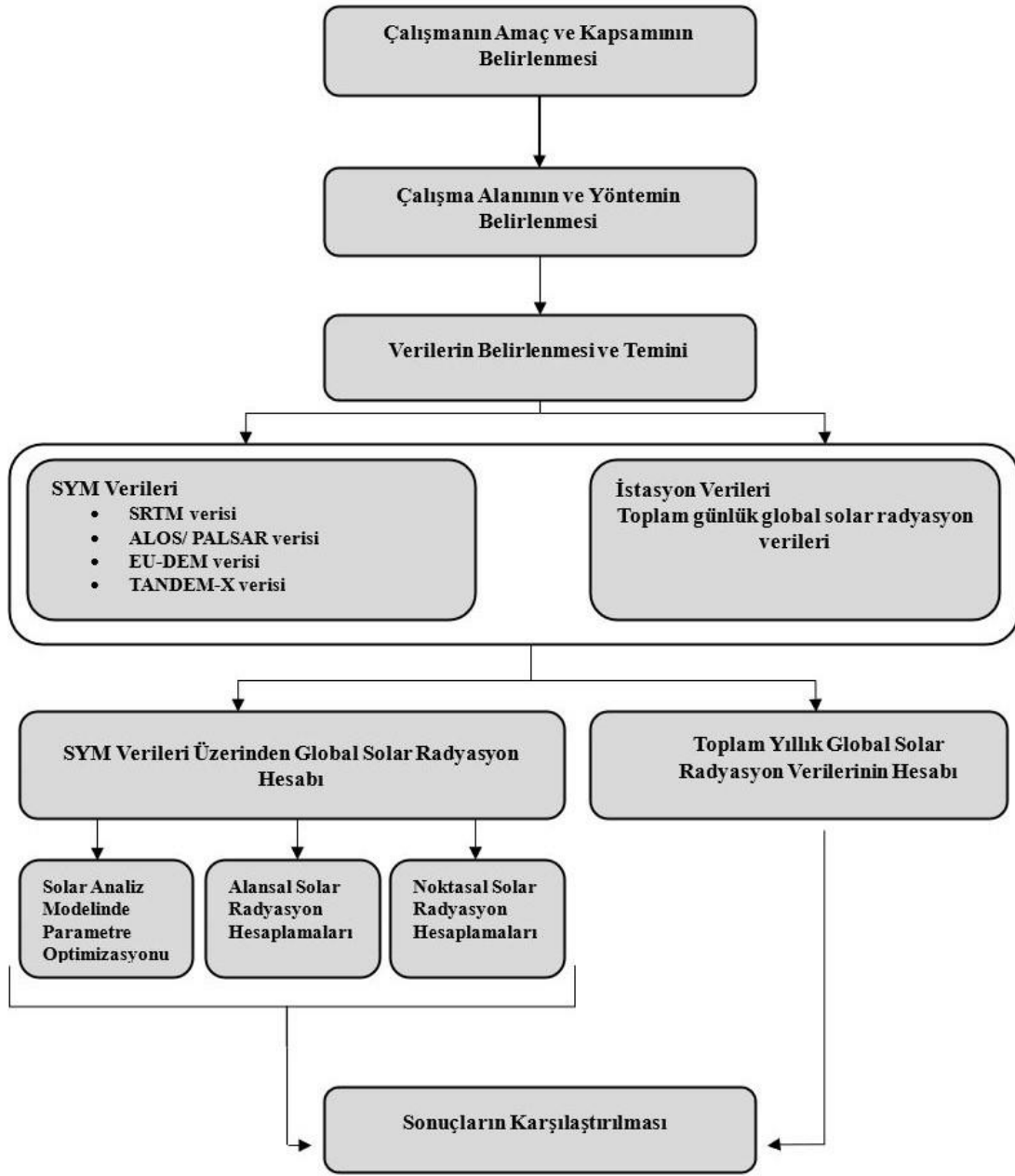
Çalışmanın bir diğer materyali MGM veri arşiv sisteminden temin edilen Eskişehir iline ait 2020-2022 günlük toplam global solar radyasyon verileridir.

Tez çalışmasında MGM veri arşiv sisteminden Eskişehir ilinde solar radyasyon ölçümü yapan istasyonlara ait 2021-2023 periyotlu günlük toplam global solar radyasyon verileri istenmiştir. Şehir genelinde 17 adet meteorolojik gözlem istasyonu olmasına rağmen sadece Odunpazarı/ Kireçköyü, İnönü/ THK Tesisleri ve Mihalıççık/ Kızıltepe Orman Sahası istasyonlarında yersel ölçümlerle solar radyasyon ölçümü yapıldığı için bu üç istasyona ait veriler temin edilmiştir. Bu veriler gün bazlı incelenmiş olup, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda Kasım ayında 2 gün ölçüm yapılmadığı tespit edilmiştir. Bu tespitler doğrultusunda, çalışmanın sonunda yapılacak olan, SYM'ler üzerinden hesaplanan solar radyasyon değerleri ile istasyonlarda ölçülen bu değerleri karşılaştırma işlemlerinin en doğru sonucu vermesi için eksik gün sayısı en az olan 2022 yılı tercih edilmiştir.

Çalışma yıl genelinde yapılacağı için, her 3 istasyon için de temin edilen günlük toplam global solar radyasyon verileri yıllık solar radyasyon verilerine çevrilmiştir.

3.3. Yöntem

Çalışmanın yöntemi, 4 farklı çözünürlükte SYM verisi kullanarak, Solar Analiz modelinde çalışma alanının konumu ve topografik yapısına en uygun değişkenlerin belirlenmesi ve bu değişkenleri kullanarak çalışma alanına ait solar radyasyon değerlerinin tespit edilip, meteorolojik ölçüm istasyonlarında ölçülen değerlerle karşılaştırılmasına yönelik aşamaları içermektedir. Çalışma alanı için solar radyasyonun hesaplanmasında, güneş enerji potansiyeline duyulan ihtiyacın kısa sürede, düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta hesaplanması ve güneş enerjisi odaklı yatırım yapacak kuruluşlar için altlık teşkil etme düşüncesi yer almaktadır. Bu amaçla, solar radyasyon hesaplamalarında yapılan analiz çalışmalarına ilişkin yöntem akış şeması Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

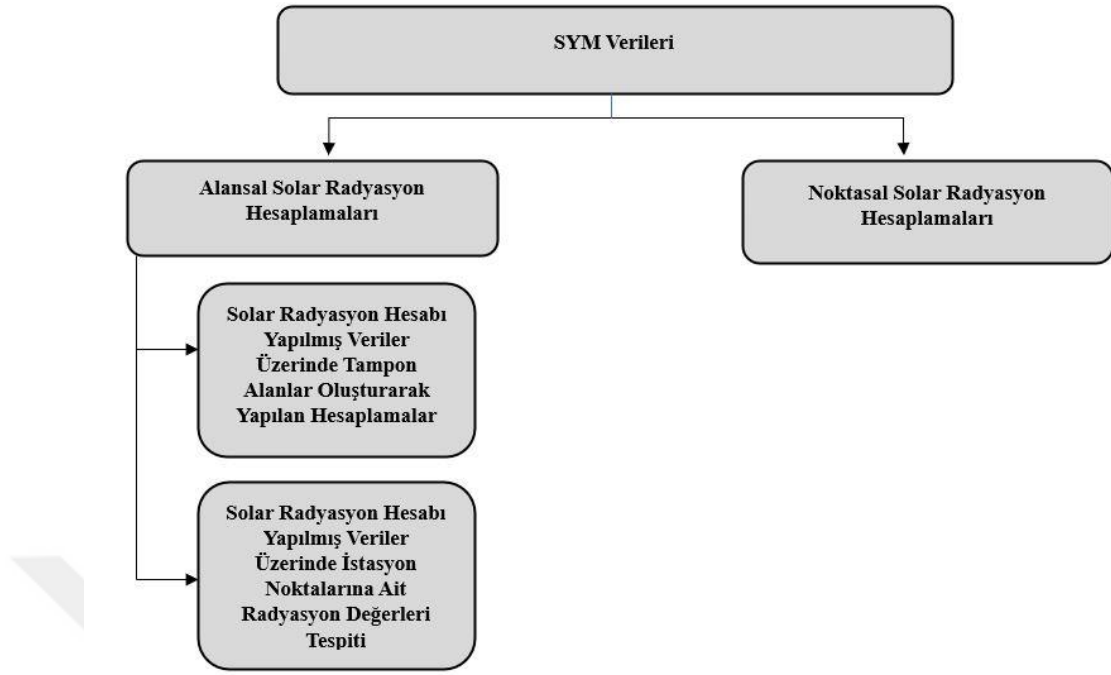


Şekil 3.6. Yöntem akış şeması

Yöntem akış şemasında da görüldüğü üzere, çalışma dört temel aşamadan oluşmakta olup bunlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

- Çalışmanın ilk aşamasını SYM veri setlerini ve meteorolojik istasyonlara ait 2021-2023 periyotlu günlük toplam global solar radyasyon verilerini temin etmek oluşturmaktadır. Bu veriler hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.2.1’de ve Bölüm 3.2.2’de verilmiştir.

- İkinci aşamada, daha önce yapılan çalışmalarda kabul görmüş olan SRTM verileri kullanılarak, CBS ortamında çalışma alanının topografik yapısına en uygun topografik parametreler, deneme yanılma yöntemiyle belirlenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemde en doğru sonuçlara ulaşmak için direkt istasyon noktalarının bulunduğu koordinatlarda hesaplanan solar radyasyon değerleri baz alınmıştır. Bu doğrultuda ArcMap yazılımında solar radyasyonu hesaplamaya olanak sağlayan Solar Analiz modeli ile entegre çalışan ASR ve (PSR) araçları kullanılarak çalışma alanına ait SYM verileri üzerinden alansal ve nokta bazlı olarak solar radyasyon hesabı yapılmıştır. Daha sonra ASR aracıyla hesaplanan solar radyasyon haritaları üzerinde, istasyon noktalarını içerisine alan 50 m yarıçapında tampon alanlar oluşturarak, bu tampon alanlarda ortalama solar radyasyon (OSR) değerleri hesaplanmıştır. Bu işlemin yapılmasındaki amaç, nokta bazlı hesaplamalarda olası bir hatayı minimize etmektir. Sonrasında istasyon noktalarına ait solar radyasyon değerleri de okunmuştur. Elde edilen sonuçların doğruluğunu tespit etmek için RMSE oranı ve bağıl hata hesaplanmıştır. Bu aşamada bahsedilen hesaplamalara ilişkin adımları gösteren yöntem iç akış şeması Şekil 3.7’de verilmiştir.
- Üçüncü aşamada, diğer SYM verileri kullanılarak CBS ortamında hem alansal olarak hem de nokta bazlı solar radyasyon hesabı yapılmıştır ve sonuçlar yine CBS ortamında haritalandırılmıştır.
- Dördüncü aşamada, ikinci ve üçüncü aşamalar sonrasında elde edilen bilgiler ve haritalar doğrultusunda, RMSE oranı ve bağıl hata hesaplanarak doğruluk analizi yapılmıştır.



Şekil 3.7. Yöntem iç akış şeması

Bu bölümün alt başlıklarında yöntemlere ilişkin daha detaylı açıklamalara yer verilmektedir.

3.3.1. Global Solar Radyasyonun Hesaplanması

Belirli bir konum veya alan için hesaplanan radyasyon miktarı global radyasyon olarak verilmektedir. Doğrudan, yaygın ve global solar radyasyonun hesaplanması her bir özellik konumu veya topografik yüzey üzerindeki her konum için tekrarlanarak tüm coğrafi alan için güneş ışığı haritaları üretilir. Bu tez çalışmasında 4 farklı SYM kullanılarak global solar radyasyon hesabı yapılmıştır. Bu hesaplama için ArcGIS ASR ve PSR araçlarına entegre olan Solar Analiz modeli kullanılmıştır.

Solar Analiz ile solar radyasyon değerini hesaplamak için aşağıdaki adımları uygulamak gerekmektedir.

- veri hazırlama ve ön işleme,
- parametrelerin ayarlanması ve Solar Analiz'in yapılandırılması,
- modelin yürütülmesi,
- çıktıların derlenmesi veya görselleştirilmesi.

Solar Analiz, solar radyasyonun değerlendirilmesinde en sık kullanılan çevresel modellerden biridir. Solar Analiz, birincil girdi olarak bir SYM'ye ihtiyaç duyar. SYM'nin her raster hücresi için Solar Analiz, yarım küre fotoğraflarla karşılaştırılabilecek yukarıya bakan bir görüş alanı oluşturur. Solar Analiz daha sonra SYM' nin kapsadığı her konum için çevredeki topografik özelliklerden gökyüzü engelini oluşturur. Koyu gri bölgeler engellenen alanları gösterirken, açık gri bölgeler yukarıya bakan görüş alanının güneşte görülebilen alanını göstermektedir. Model, her konumdaki birleşik doğrudan ve yaygın solar radyasyon tahminlerini verir. SYM, ESRI (Environmental Systems Research Institute)' nin ArcGIS ASR ve PSR araçlarına entegre edilen model için ana girdidir. Model, ArcGIS yazılımı tarafından desteklenen tüm koordinat sistemlerindeki verileri kabul etmektedir.

Giriş verileri toplandıktan sonraki adım, modelin yürütülmesi için uygun konumsal, zamansal ve fiziksel parametre ayarlarının belirlenmesidir. Parametre değerlerinin ayarlanması tahmin ve deneyim yani modelleyicinin subjektif kararlarını gerektiren bir süreçtir. Bölüm 4.1' de bu parametrelerden detaylı olarak bahsedilmiştir.

Son olarak, çalışma alanı genelinde solar radyasyonu hesaplamak için ESRI Solar Analiz "ASR" ve "PSR" aracı kullanılmaktadır. Modelin ana çıktısı, çalışma alanı boyunca global (doğrudan ve yaygın) solar radyasyon potansiyeli hakkında bilgi içeren bir rasterdir.

Çalışma konusu olan global solar radyasyonun hesaplanmasında kullanılan modelin arka yüzünde gerçekleşen hesaplamalar şu şekildedir:

(Global_{tot}), sırasıyla tüm güneş ışığı haritasından doğrudan (Dir_{tot}) ve yaygın (Dif_{tot}) radyasyonun toplamı olarak hesaplanır(Fu, 2000).

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (3.1)$$

Doğrudan solar radyasyon (Dir_{tot}), tüm güneş haritası birimlerinden gelen doğrudan güneş ışığının (Dir_{θ, α}) toplamıdır:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{(\theta, \alpha)} \quad (3.2)$$

Zenit açısında (θ) ve azimut açısında (α) ağırlık merkezi bulunan güneş haritası biriminden (Dir_{θ, α}) doğrudan güneş ışığı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$Dir_{\theta, \alpha} = S_{Const} * \beta^{m(\theta)} * SunDur_{\theta, \alpha} * SunGap_{\theta, \alpha} * \cos (AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (3.3)$$

Burada yer alan parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

- S_{Const} — Güneş sabiti olarak bilinen, ortalama dünya-güneş mesafesindeki atmosfer dışındaki güneş akışıdır. Analizde kullanılan güneş sabiti 1367 W/m^2 dir. Bu, Dünya Radyasyon Merkezi'nin (WRC) güneş sabiti ile tutarlıdır.

- β — En kısa yol için (zenit yönünde) atmosferin geçirgenliğidir (tüm dalga boylarının ortalaması alınır).

- $m(\theta)$ — Zirve yolu uzunluğuna göre orantı olarak ölçülen bağıl optik yol uzunluğudur.

- $SunDur_{\theta, \alpha}$ — Gökyüzü birimi tarafından temsil edilen zaman süresidir. Çoğu birim için, gün aralığının (örneğin bir ay) saat aralığıyla (örneğin yarım saat) çarpımına eşittir. Kısmi birimler için (ufka yakın), süre küresel geometri kullanılarak hesaplanır.

- $SunGap_{\theta, \alpha}$ — Güneş haritası birimleri için boşluk oranıdır.

- $AngIn_{\theta, \alpha}$ — Gökyüzü biriminin ağırlık merkezi ile yüzeye normal eksen arasındaki geliş açısıdır.

Bağıl optik uzunluk, $m(\theta)$, güneşin zenit açısı ve deniz seviyesinden yüksekliği ile belirlenir. 80° 'den küçük başucu açıları için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$m(\theta) = \text{EXP}(-0.000118 * \text{Elev} - 1.638 * 10^{-9} * \text{Elev}^2) / \cos(\theta) \quad (3.4)$$

Burada θ : Güneşin zirve açısı, Elev: Deniz seviyesinden metre cinsinden yükseklik olarak ifade edilmiştir.

Yüzey yöneliminin etkisi, geliş açısının kosinüsü ile çarpılarak dikkate alınır. Yakalama yüzeyi ile zenit açısı ve azimut açısındaki bir ağırlık merkezi ile belirli bir gökyüzü birimi arasındaki geliş açısı ($AngIn_{Sky_{\theta, \alpha}}$) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$AngIn_{\theta, \alpha} = \cos(\cos(\theta)) * \cos(G_z) + \sin(\theta) * \sin(G_z) * \cos(a - G_a) \quad (3.5)$$

Burada G_z : Yüzey zirve açısı, G_a : Yüzey azimut açısıdır (Fu & Rich, 2002).

Yaygın solar radyasyon ise şu şekilde hesaplanır; her gökyüzü birimi için, ağırlık merkezindeki (Dif) yaygın radyasyon hesaplanıp, zaman aralığı boyunca entegre edilir ve aşağıdaki denklem kullanılarak boşluk oranı ve geliş açısı ile düzeltilir (Rich et al., 1994):

$$Dif_{\theta, \alpha} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyGap_{\theta, \alpha} * Weight_{\theta, \alpha} * \cos(AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (3.6)$$

Bu denklemde yer alan parametrelerin açıklamaları aşağıda verilmiştir:

- R_{glb} — Global normal radyasyon
- P_{dif} — Yayılan global normal radyasyon akışının oranı. Tipik olarak çok açık gökyüzü koşulları için yaklaşık 0,2 ve çok bulutlu gökyüzü koşulları için 0,7'dir.
- Dur — Analiz için zaman aralığı.
- $SkyGap_{\theta,\alpha}$ — Gökyüzü birimi için boşluk oranı (görünür gökyüzünün oranı).
- $Weight_{\theta,\alpha}$ — Belirli bir gökyüzü biriminden kaynaklanan yaygın radyasyonun tüm birimlere göre oranı
- $AngIn_{\theta,\alpha}$ — Gökyüzü biriminin ağırlık merkezi ile yakalayan yüzey arasındaki geliş açısı

Global normal radyasyon (R_{glb}), her birimden (engellenen birimler dahil) gelen doğrudan radyasyonun, geliş açısı düzeltilmesi olmadan toplanması, ardından doğrudan radyasyonun oranı için düzeltme yapılmasıyla hesaplanabilir; bu, $1-P_{dif}$ 'e eşittir:

$$R_{glb} = (S_{Const} \Sigma(\beta^{m(\theta)})) / (1-P_{dif}) \quad (3.7)$$

Düzgün gökyüzü yayılım modeli için Ağırlık $_{\theta,\alpha}$ aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) / Div_{azi} \quad (3.8)$$

Burada θ_1 ve θ_2 Gökyüzü sektörünün sınırlayıcı zenit açılarını, Div_{azi} Gökyüzü haritasındaki azimut bölümlerinin sayısını ifade etmektedir.

Standart bulutlu gökyüzü modeli için Ağırlık $_{\theta,\alpha}$ şu şekilde hesaplanır:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (2\cos\theta_2 + \cos2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos2\theta_1) / 4 * Div_{azi} \quad (3.9)$$

Toplam yaygın solar radyasyonu (Dif_{tot}), tüm gökyüzü haritası birimlerinden gelen yaygın solar radyasyonun (Dif) toplamı olarak hesaplanır:

$$Dif_{tot} = \Sigma Dif_{\theta,\alpha} \quad (3.10)$$

3.3.2. RMSE Oranı ve Bağıl Hata Hesaplamaları

Bu çalışma kapsamında her istasyon noktası için SYM verileri kullanılarak hesaplanan solar radyasyon değerleri ile yer gözlem istasyonlarında ölçülen solar radyasyon değerleri arasında korelasyon aranmıştır. Bu amaçla SYM verileri kullanılarak hesaplanan değerler ile istasyonlarda ölçülen değerler arasında istatistiksel birtakım hesaplamalar yapılmıştır.

RMSE oranı, bir ölçünün doğruluğunu ya da duyarlılığını gösteren bir kavramdır ve nasıl hesaplandığı aşağıda verilmiştir.

$$F = S(h) - S(g) \quad (3.11)$$

$$RMSE = (\sum_{i=1}^n F / n)^{1/2} \quad (3.12)$$

Burada F, SYM verilerinden hesaplanan solar radyasyon değeri ile gözlem istasyonlarında ölçülen solar radyasyon değeri arasındaki fark, S(h), SYM verilerinden hesaplanan solar radyasyon değeri, S(g), gözlem istasyonlarında hesaplanan solar radyasyon değeri, n, toplam veri sayısıdır.

Hata payı oranı yani bağıl hata, bir araştırma, deney veya ölçüm sonucunun ne kadar güvenilir olduğunu gösteren bir istatistiksel kavramdır. Başka bir deyişle, elde edilen sonucun gerçek değerden ne kadar sapma gösterebileceğini ifade eder. Bu hesaplamanın formülü aşağıda gösterilmiştir.

$$e^x = |\bar{x} - x| \quad (3.13)$$

$$r_x = e^x / x \quad (3.14)$$

Burada $\bar{x}$, bir gözlem istasyonlarında ölçülen solar radyasyon değeri, x, SYM verileri kullanılarak hesaplanan solar radyasyon değeridir.

3.3.2.1. ASR ve PSR aracında yer alan parametreler

Bu bölümde yer alan Tablo 3.2’de ASR aracında kullanılan parametreler hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

Tablo 3.2. ASR aracında yer alan parametreler

PARAMETRELER	AÇIKLAMA
Girdi tarama örüntüsü	Girdi veriyi oluşturan SYM
Enlem	Saha alanının enlemi, kuzey yarımküre için pozitif değerlere ve güney yarımküre için negatif değerlere sahip ondalık dereceler cinsinden ölçülür. Bu değer, saha alanının ortalama enlem konumunu temsil eder. Uzamsal bir referans içeren SYM verileri için ortalama enlem otomatik olarak hesaplanır ya da kullanıcı tarafından manuel olarak girilir.

Tablo 3.2. (Devam) *ASR aracında yer alan parametreler*

Zaman yapılandırması	Hesaplamalar, bir yıl içindeki birden çok gün için gerçekleştirilecektir. Başlangıç yılının, başlangıç gününün ve bitiş gününün belirtilmesi gerekmektedir. Bitiş gününün başlangıç gününden küçük olması durumunda bitiş günü bir sonraki yıl olarak kabul edilir.																				
Gün aralığı	Güneş haritası için gökyüzü birimlerinin hesaplanmasında kullanılacak yıl içindeki zaman aralığıdır. Varsayılan değer 14'tür (iki haftada bir).																				
Saat Aralığı	Güneş haritası için gökyüzü sektörlerinin hesaplanmasında kullanılacak gün içindeki zaman aralığı. Varsayılan değer 0,5'tir.																				
Z faktörü	Z faktörü, SYM verisinin koordinat birimlerinden farklı olduğunda z biriminin ölçü birimlerini ayarlar. Nihai çıkış yüzeyi hesaplanırken giriş yüzeyinin z değerleri z faktörü ile çarpılır. X ve Y aynı ölçü birimlerindeyse z faktörü 1'dir. Bu varsayılan değerdir. X, Y birimleri ve Z birimleri farklı ölçü birimlerindeyse z faktörünün uygun faktöre ayarlanması gerekir, aksi takdirde sonuçlar yanlış olur. Aşağıda enlem değerine göre z faktörünün alacağı değerler gösterilmiştir. <table><thead><tr><th>Enlem</th><th>Z faktörü</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0.00000898</td></tr><tr><td>10</td><td>0.00000912</td></tr><tr><td>20</td><td>0.00000956</td></tr><tr><td>30</td><td>0.00001036</td></tr><tr><td>40</td><td>0.00001171</td></tr><tr><td>50</td><td>0.00001395</td></tr><tr><td>60</td><td>0.00001792</td></tr><tr><td>70</td><td>0.00002619</td></tr><tr><td>80</td><td>0.00005156</td></tr></tbody></table>	Enlem	Z faktörü	0	0.00000898	10	0.00000912	20	0.00000956	30	0.00001036	40	0.00001171	50	0.00001395	60	0.00001792	70	0.00002619	80	0.00005156
Enlem	Z faktörü																				
0	0.00000898																				
10	0.00000912																				
20	0.00000956																				
30	0.00001036																				
40	0.00001171																				
50	0.00001395																				
60	0.00001792																				
70	0.00002619																				
80	0.00005156																				
Eğim ve görünüş giriş tipi	Analiz için eğim ve bakı bilgilerinin nasıl elde edileceğini belirtir. From DEM: Eğim ve görünüş taramaları, SYM verisi üzerinden hesaplanacaktır. Bu varsayılandır.																				
Hesaplama talimatları	Görüş alanı hesaplanırken kullanılacak azimut yönlerinin sayısıdır. Geçerli değerler 8'in katları olmalıdır (8, 16, 24, 32 vb.). Varsayılan değer, karmaşık topografya için yeterli olan 32 yöndür.																				
Zenit bölümleri	Gökyüzü haritasında gökyüzü birimlerini oluşturmak için kullanılacak zenit bölümlerinin sayısı. Varsayılan sekiz bölümdür.																				
Azimut bölümleri	Gökyüzü haritasında gökyüzü birimlerini oluşturmak için kullanılacak azimut bölümlerinin sayısını temsil etmektedir. Varsayılan sekiz bölümdür. Geçerli değerler 8'in katları olmalıdır. Değerler sıfırdan büyük ve 160'tan küçük olmalıdır.																				

Tablo 3.2. (Devam) *ASR aracında yer alan parametreler*

Yaygın model türü	Uniform sky: Tek tip dağınık model kullanılacaktır. Gelen dağınık radyasyon tüm gökyüzü yönlerinden aynıdır. Bu varsayılandır. Standard overcast sky: Standart bulutlu dağınık model kullanılacaktır. Gelen dağınık radyasyon akısı zenit açısına göre değişir.
Yaygın oran	Yaygın olan küresel normal radyasyon akışının oranı. Değerler 0 ile 1 arasında değişir. Genel olarak açık gökyüzü koşulları için varsayılan değer 0,3'tür.
İletkenlik	Atmosferden geçen radyasyonun oranı (ortalama genel dalga boyları). Değerler 0 (iletim yok) ile 1 (tüm iletim) arasında değişir. Genel olarak açık bir gökyüzü için varsayılan değer 0,5'tir.
Çözünürlük/ Gökyüzü boyutu	Gökyüzü boyutu, radyasyon hesaplamalarında kullanılan görüş alanı, gökyüzü haritası ve güneş haritası raster çözünürlüğüdür ve coğrafi bir koordinat sistemine sahip değildir. Maksimum gökyüzü boyutu değeri 10.000'dir. 200 değeri varsayılan değerdir ve büyük gün aralıklarına sahip (örneğin > 14 gün) tüm SYM'ler için yeterlidir. Gökyüzü boyutunun artması hesaplama doğruluğunu artırır ancak hesaplama süresini de önemli ölçüde artırır. Gün aralığı ayarı küçük olduğunda (örneğin, < 14 gün), daha büyük bir gökyüzü boyutu kullanılmalıdır. Analiz sırasında, doğrudan radyasyonu hesaplamak için belirli zaman dilimlerindeki güneş konumlarını (izlerini) temsil etmek için güneş haritası (gökyüzü boyutu tarafından belirlenir) kullanılır. Daha küçük gün aralıklarında, gökyüzü boyutu çözünürlüğü yeterince büyük değilse, güneş izleri üst üste gelebilir ve bu da o iz için sıfır veya daha düşük radyasyon değerleriyle sonuçlanabilir. Çözünürlüğü artırmak daha doğru bir sonuç sağlar. Maksimum gökyüzü boyutu değeri 10.000'dir. 200 değeri varsayılan değerdir ve büyük gün aralıklarına sahip (örneğin, > 14 gün) tüm SYM'ler için yeterlidir.

PSR aracında bu parametrelerden farklı olarak giriş noktaları özelliği veya tablosu ve yükseklik ofseti parametreleri yer almaktadır. Giriş noktaları özelliği veya tablosu parametresi, Solar radyasyonun analiz edeceği konumları belirten nokta özellik sınıfı veya tablosudur. Kuzey yarım kürede pozitif, güney yarım kürede negatif değerler almaktadır. Yükseklik ofseti parametresi hesaplamaların yapılacağı SYM yüzeyindeki yüksekliği temsil etmektedir. Yükseklik ofseti tüm konumlar için uygulanır.

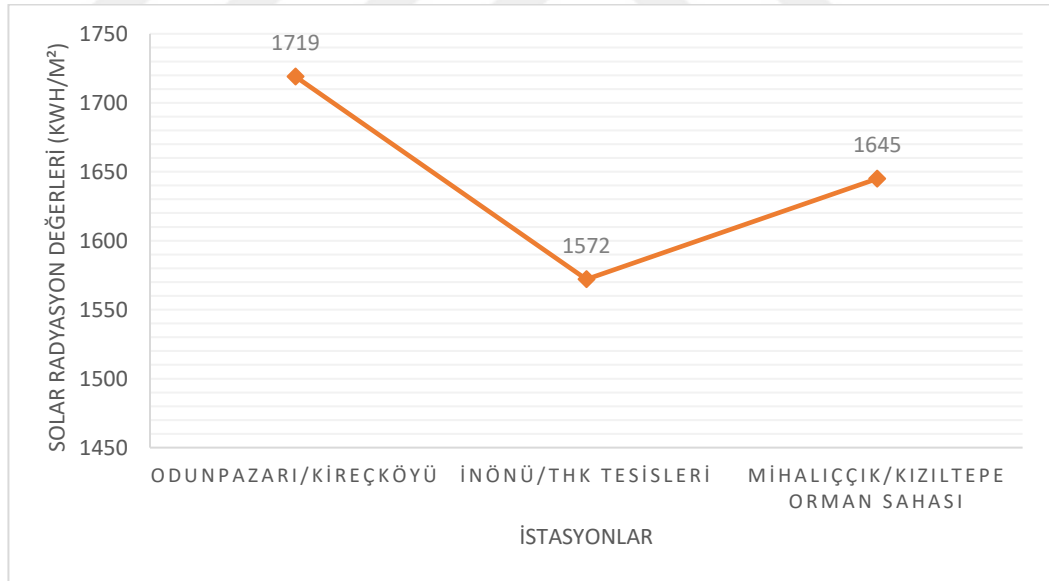
4. BULGULAR

Bu bölümde solar radyasyonun hesaplanması kapsamında yapılan hesaplamalara ilişkin temel bulgulara yer verilmiştir.

4.1. Meteoroloji Gözlem İstasyonu Verileri Kullanılarak Solar Radyasyon Hesabı

MGM veri arşiv sisteminden temin edilen, çalışma alanındaki 3 istasyona ait 2021-2023 periyotlu günlük toplam global solar radyasyon verileri, tez çalışmasında kullanıma hazır hale getirilmesi amacıyla yıl bazında hesaplamaya tabi tutulmuştur. Yapılan ön incelemede 2021 ve 2023 yıllarında istasyonda kaydı tutulan günlük solar radyasyon değerlerinde çok sayıda eksiklik olduğu gözlemlenmiştir. Bundan dolayı eksik gün sayısının az olduğu 2022 yılı istasyon verileri bu çalışma kapsamında referans alınmıştır.

Yapılan hesaplamada 2022 yılının tüm günlerine ait gözlem istasyon verileri, eksik ölçüm olan günler dikkate alınarak toplanmıştır. İstasyonlara ait yıl bazında hesaplanan toplam global solar radyasyon değerlerini gösteren grafik Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. İstasyonlara ait 2022 yılı global solar radyasyon değerleri

4.2. Parametre Optimizasyonu

Tez çalışmasında SYM verilerinden solar radyasyon hesaplamada ArcGIS Solar Analiz modülü kullanılmıştır. Bu modülde hem alansal hem de noktasal solar radyasyon hesaplaması için Tablo 3.1’de gösterilen parametrelerin optimizasyonunun yapılması

gerekmektedir. Bu kapsamda tez çalışmasında öncelikle birçok çalışmada solar radyasyon hesabı için kullanılan SRTM SYM verisi kullanılarak parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.1’de topografik parametre olan Hesaplama Yönü (Calculation Direction, CD)’nün alabileceği 4 farklı değere göre istasyon noktalarında okunan solar radyasyon değerleri gösterilmiştir. Yapılan solar radyasyon hesaplamalarında istasyon ölçüm değerlerine en yakın değeri veren topografik parametre değerinin 24 olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1. PSR aracında 4 farklı CD değerine göre hesaplanan solar radyasyon değerleri (kWH/m²)

İstasyon Adı	CD değeri=8	CD değeri=16	CD değeri=24	CD değeri=32	İstasyon ölçüm değeri
Odunpazarı/ Kireçköyü	1315	1764	1760	1310	1719
Mihaliççık/ Kızıltepe Orman Sahası	1953	1463	1464	1954	1645
İnönü/ THK Tesisleri	1832	1388	1446	1824	1572

Radyasyon parametreleri olan yaygın oran (Diffuse Proportion, DF) ve iletkenlik (Transmittivity, T) parametreleri alabilecekleri değerlere göre kendi aralarında farklı kombinasyonlara tabi tutulmuştur ve solar radyasyon hesabı yapılmıştır. Bu hesap sonucu istasyon noktalarında okunan solar radyasyon değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Radyasyon parametre değerlerine bakıldığında Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası ve İnönü/THK tesisleri istasyonlarında istasyon ölçüm değerlerine en yakın solar radyasyon değerini veren parametre değerlerinin DF=0.4/ T=0.5, Odunpazarı/ Kireçköyü istasyonunda ise bu değerlerin DF=0.3/ T=0.6 olduğu görülmüştür. Bu işlemlerden sonra çalışma boyunca bu parametre değerleri referans alınmıştır.

Tablo 4.2. PSR aracında radyasyon parametre değerlerine göre hesaplanan solar radyasyon değerleri (kWH/m²)

İstasyon Adı	DF=0.3/ T=0.5	DF=0.3/ T=0.6	DF=0.3/ T=0.4	DF=0.4/ T=0.5	DF=0.2/ T=0.5	İstasyon ölçüm değeri
Odunpazarı/ Kireçköyü	1765	1688	977	1504	1172	1719
Mihaliççık/ Kızıltepe Orman Sahası	1526	1831	1091	1648	1290	1645
İnönü/ THK Tesisleri	1339	1802	1031	1580	1255	1572

ArcMap yazılımında solar radyasyon hesabının doğru bir biçimde yapılabilmesi için ASR ve PSR aracında yer alan parametrelerin de doğru bir biçimde belirlenmesi gerekmektedir. Bu süreçte parametrelerin bazıları kullanıcının deneyim ve tecrübelerine yani subjektif kararına göre belirlenirken bazı parametreler ise ArcMap kullanma

kılavuzunda yer alan parametrelere göre belirlenmiştir. Çalışma boyunca Çözünürlük/Gökyüzü boyutu parametre değeri hem PSR hem de ASR aracında yapılan hesaplamalarda 200 alınmıştır. Bunun sebebi ArcGIS kullanma kılavuzunda 200 değerinin büyük gün aralıklarına sahip (örneğin > 14) tüm SYM'ler için yeterli olacağının belirtilmesidir. Çalışmada PSR aracında yapılan solar radyasyon hesaplamalarında Odunpazarı/ Kireçköyü, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası ve İnönü/THK Tesisleri istasyonları için enlem değerleri sırasıyla 39.7720, 40.0208 ve 39.8184 olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Tablo 4.3'te bu parametrelere ait bilgilere ve çalışma boyunca referans alınan ayar değerlerine yer verilmiştir.

Tablo 4.3. Çalışmada noktasal ve alansal solar radyasyon hesabı için optimize edilen parametre değerleri

PARAMETRELER	ALANSAL	NOKTASAL
Enlem	39.599835°	İlgili istasyonun enlem değeri
Çözünürlük/Gökyüzü boyutu	200	200
Yıl	2022	2022
Başlangıç günü	1 Ocak	1 Ocak
Son gün	31 Aralık	31 Aralık
Gün aralığı	14	14
Saat aralığı	0.5	0.5
Z faktörü	0.00001171	0.00001171
Eğim ve bakı tipi	SYM'den hesaplama	SYM'den hesaplama
Hesaplama talimatları	24	24
Zenit bölümleri	8	8
Azimut bölümleri	8	8
Yaygın Model Türü	Uniform_sky	Uniform_sky
Yaygın oran	0.3&0.4	0.3&0.4
İletkenlik	0.5&0.6	0.5&0.6

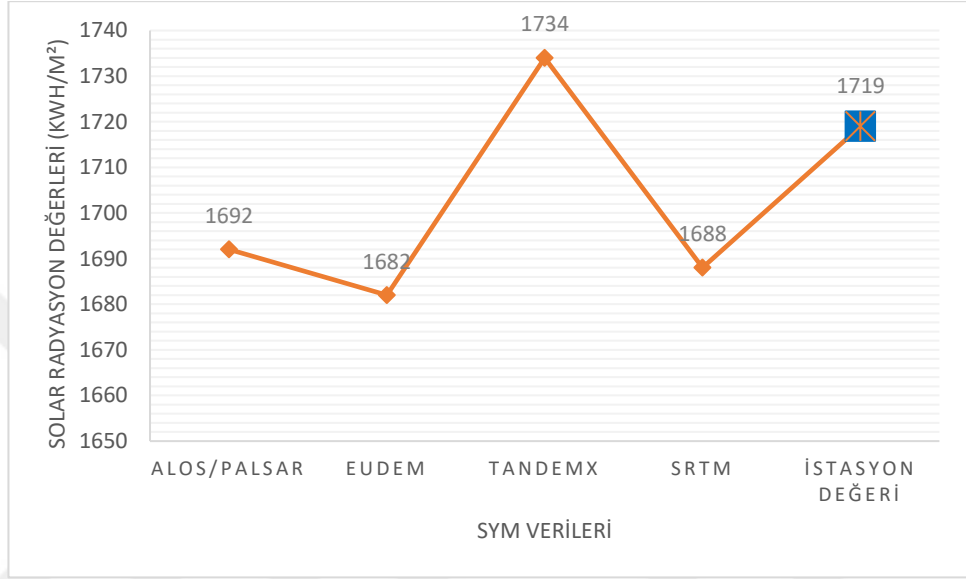
Daha önce yapılan çalışmalarda gökyüzü haritası bölümleri sayısının artmasının (zenit ve azimut) global radyasyonu çok fazla miktarda etkilemediği tespit edilmiştir. Bu sebeple ArcMap yazılımında, zenit ve azimut bölümleri değerlerini yazılımın varsayılan değeri olan 8-8 olarak alınmasının hesaplamalarda yeterli olacağı belirtilmiştir (Fu&Rich, 1999).

4.3. SYM Verileri Kullanarak Solar Radyasyon Hesabı

Bu bölümde, daha önceki bölümde bahsedilen parametre değerleri kullanılarak farklı çözünürlükteki SYM verileri üzerinden alansal ve nokta bazlı olarak solar radyasyon hesabı yapılmıştır. Bu bölümün alt başlıklarında yapılan hesaplamalara ait detaylı bilgilere yer verilmiştir.

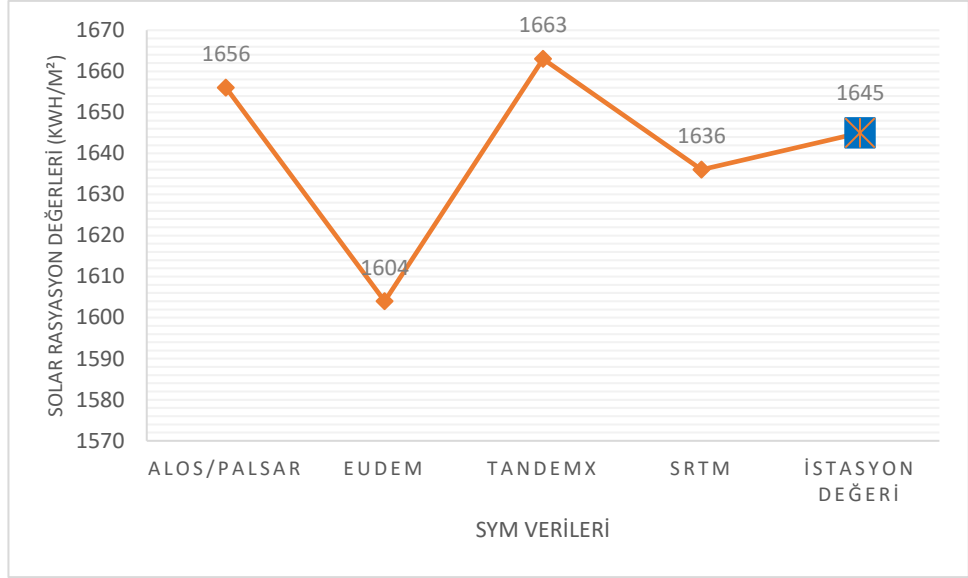
4.3.1. Noktasal olarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları

Çalışma alanının genelinde, PSR aracında belirtilen parametre değerleri kullanılarak solar radyasyon hesabı yapılmıştır ve bu değerlerle, istasyonlarda yapılan yersel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Farklı SYM'ler kullanarak istasyon noktalarında hesaplanan solar radyasyon değerleri Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.



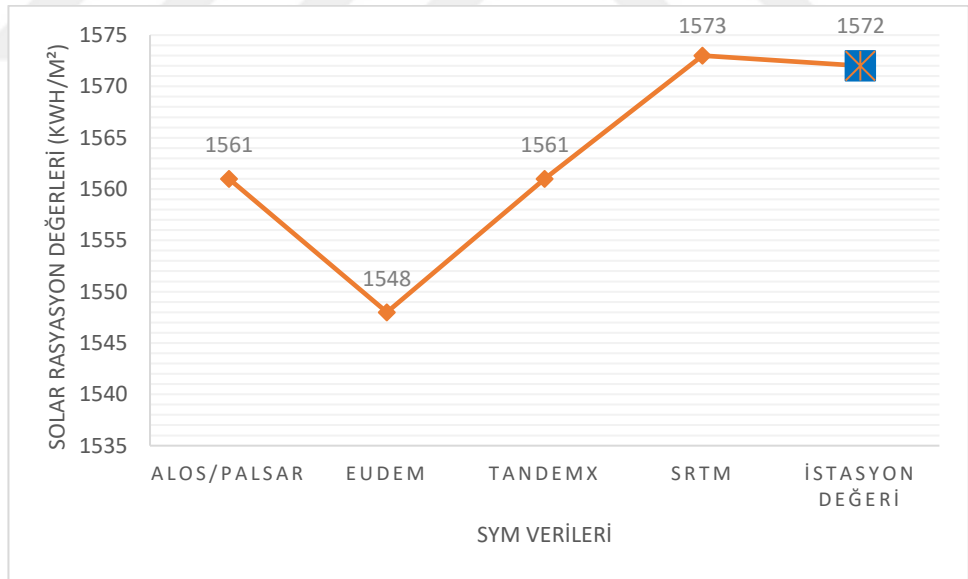
Şekil 4.2. Odunpazarı/Kireçköyü istasyonuna ait solar radyasyon değeri

Yapılan karşılaştırma sonucu Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda en doğru sonucu 15 kWh/m² farkla TANDEM-X verisinin verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.3. Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonuna ait solar radyasyon değeri

Mihaliççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda en doğru sonucu 9 kWh/m² farkla SRTM verisi vermiştir.

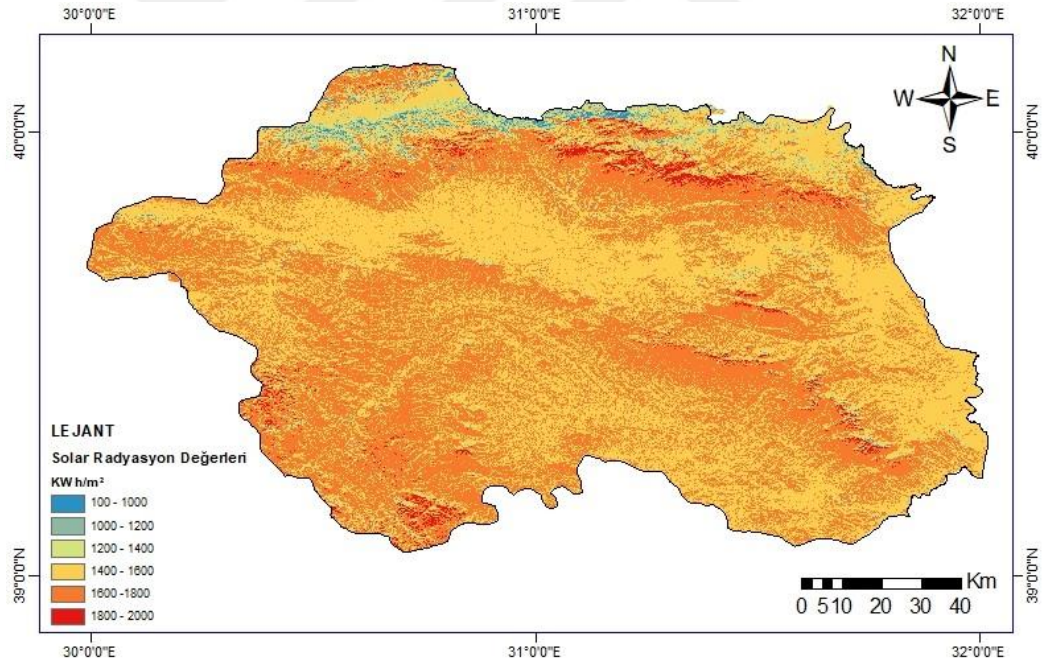


Şekil 4.4. İnönü/THK Tesisleri istasyonuna ait solar radyasyon değeri

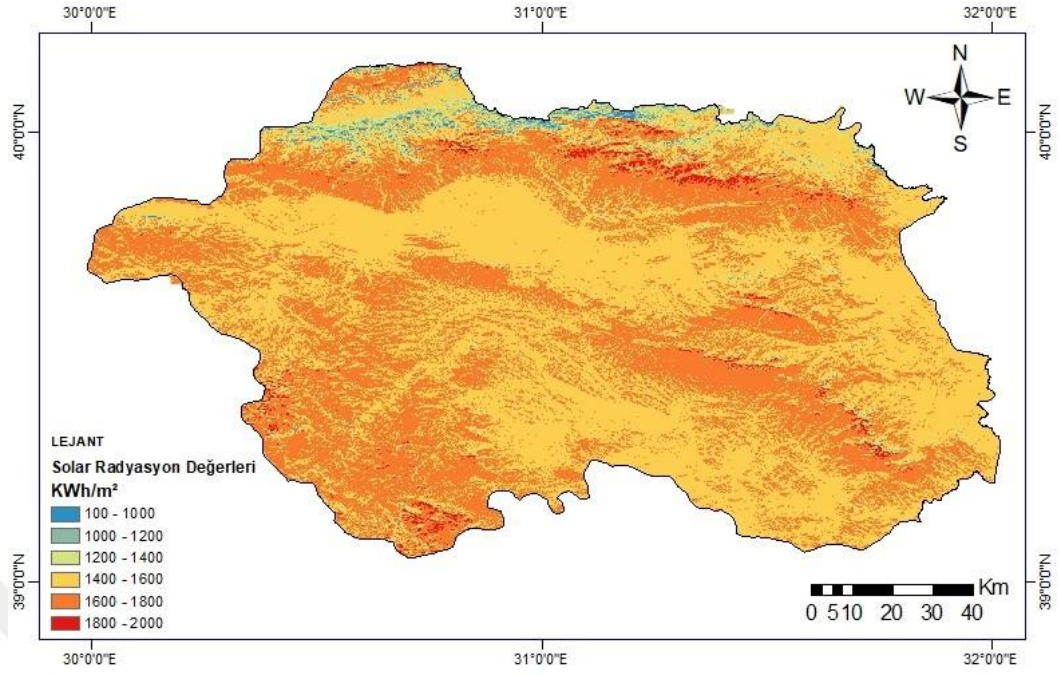
İnönü/THK Tesisleri istasyonlarında en doğru sonucu 1 kWh/m² farkla SRTM verisi vermiştir.

4.3.2. Alansal olarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları

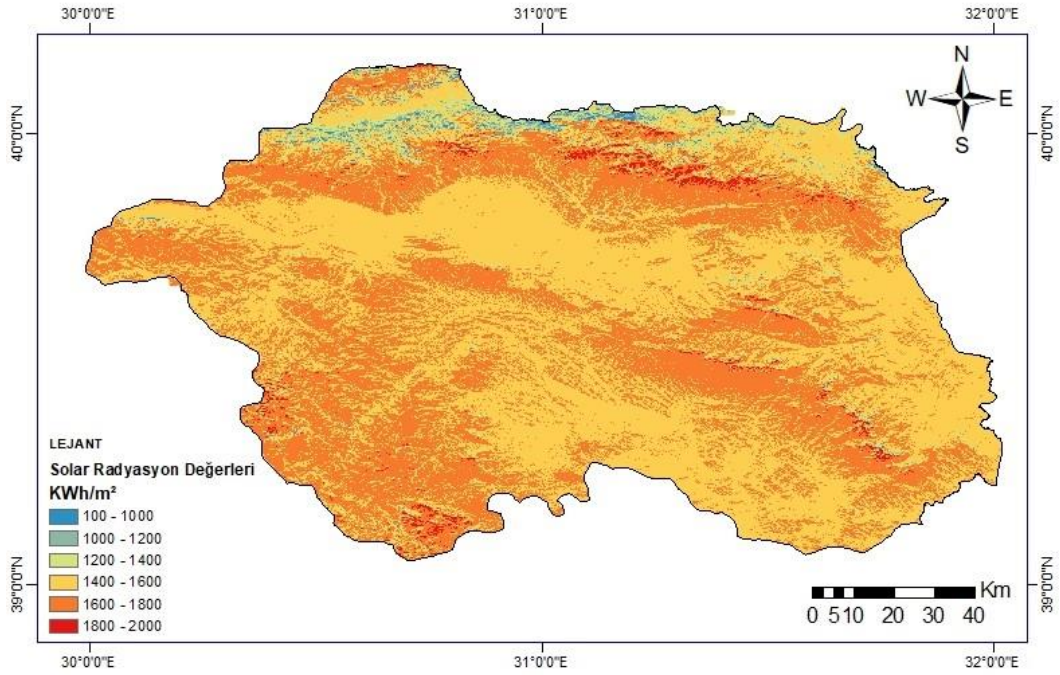
Tez çalışmasında öncelikle optimizasyon sonucu belirlenen Solar Analiz modülü parametrelerine göre SYM verilerinden alansal solar radyasyon hesabı yapılarak solar radyasyon haritaları (Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8) üretilmiştir. Bu haritalar üzerinden istasyon noktalarına denk gelen alanlardaki solar radyasyonu belirlemek için iki farklı yaklaşım izlenmiştir. Bu yaklaşımlardan birincisi istasyon noktalarının solar radyasyon haritalarından elde edilen değerlerinin belirlenmesi; ikincisi ise istasyon noktalarına atılan 50 m yarıçapına düşen tampon alan içindeki OSR değerlerinin belirlenmesidir. Burada 50 m yarıçaplı tampon bölge oluşturmada amaç istasyon noktalarındaki konumsal kayıklıklardan kaynaklanacak hataları minimize etmektir. Bu alanlar içerisindeki istasyon noktalarına ait solar radyasyon değerleri ve OSR değerleri Şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 ve 4.14’te verilmiştir.



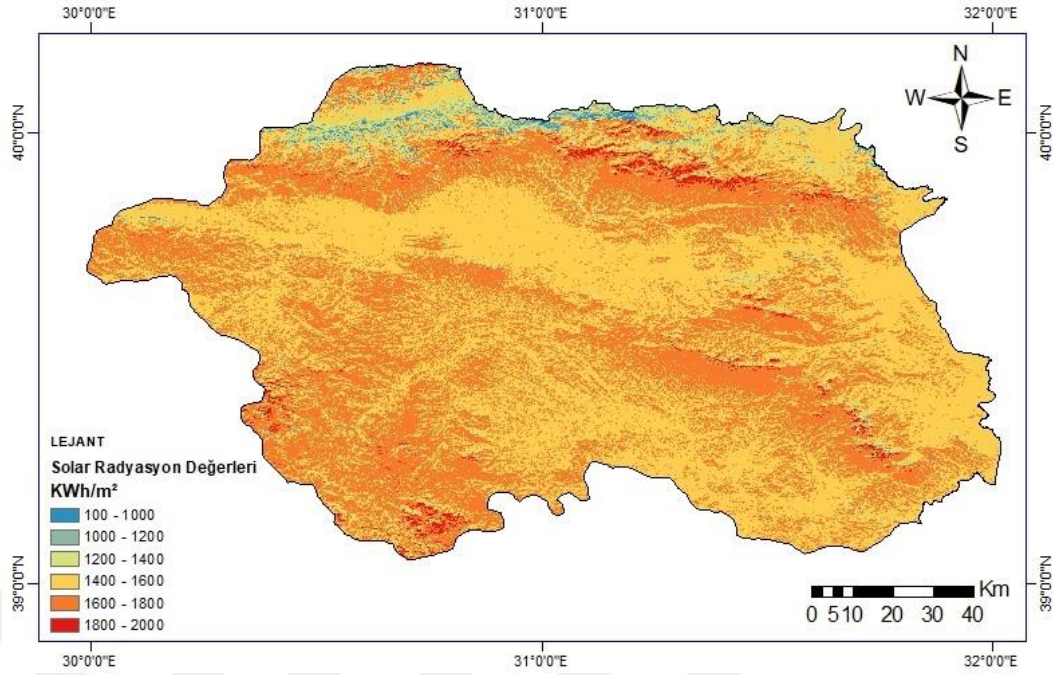
Şekil 4.5. ALOS/PALSAR solar radyasyon haritası



Şekil 4.6. EUDEM solar radyasyon haritası

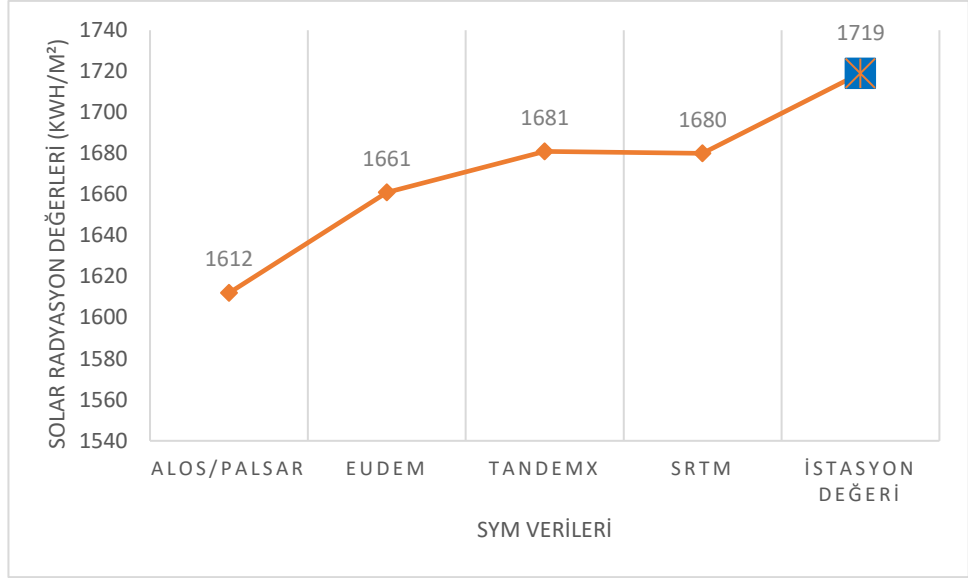


Şekil 4.7. TANDEM-X solar radyasyon haritası

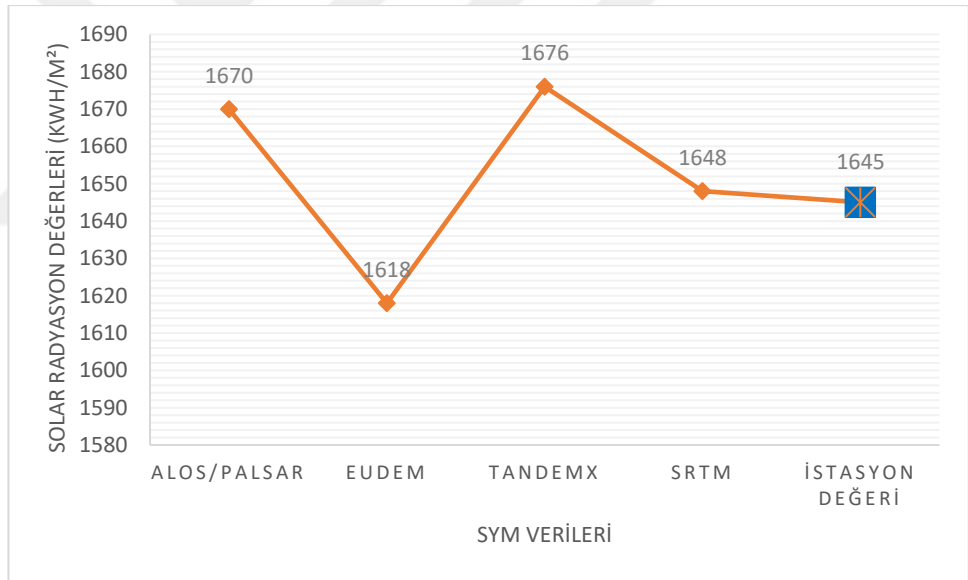


Şekil 4.8. SRTM solar radyasyon haritası

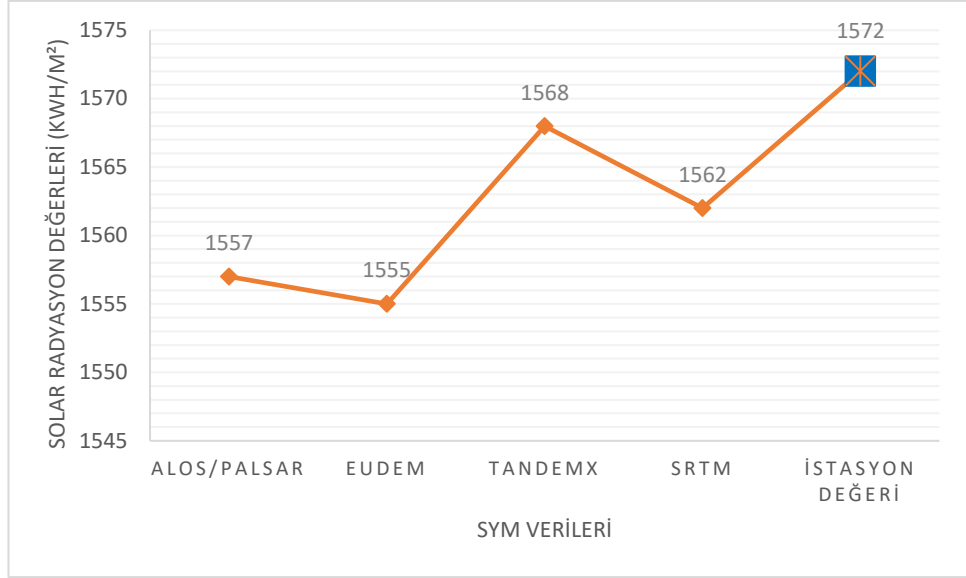
Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de yer alan solar radyasyon haritaları incelendiğinde ALOS/PALSAR SYM verisi üzerinden yapılan solar radyasyon hesabına göre elde edilen sonuçların 138 kWh/m² ve 1985 kWh/m² değer aralığında olduğu, EU-DEM SYM verisi üzerinden yapılan solar radyasyon hesabı sonucunda elde edilen sonuçların 133 kWh/m² ve 1974 kWh/m² değer aralığında olduğu, TANDEM-X SYM verisi üzerinden yapılan solar radyasyon hesabına göre elde edilen sonuçların 92 kWh/m² ve 1985 kWh/m² değer aralığında olduğu ve SRTM SYM verisi üzerinden yapılan solar radyasyon hesabı sonucunda elde edilen sonuçların 300 kWh/m² ve 1972 kWh/m² değer aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.9. *Odunpazarı/Kireçköyü istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri*



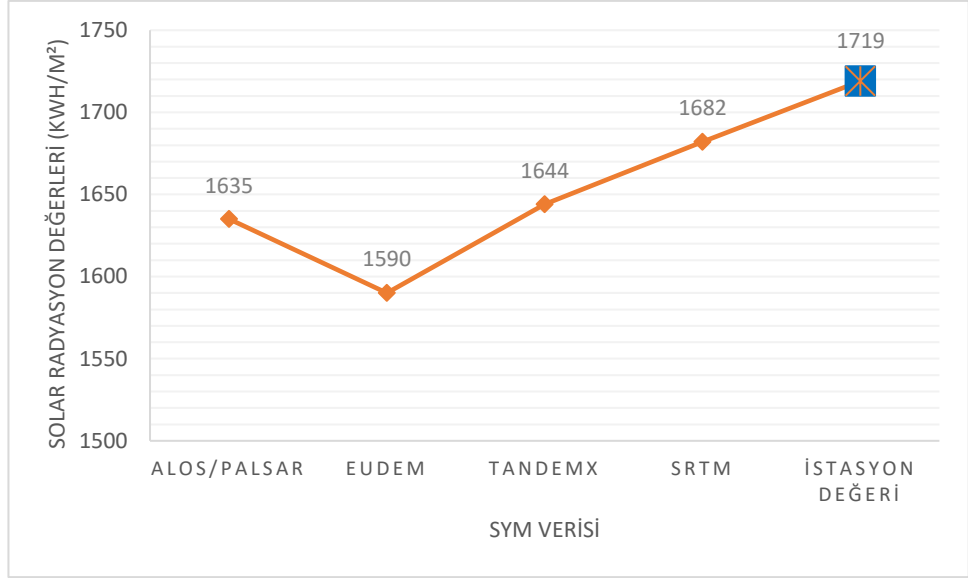
Şekil 4.10. *Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri*



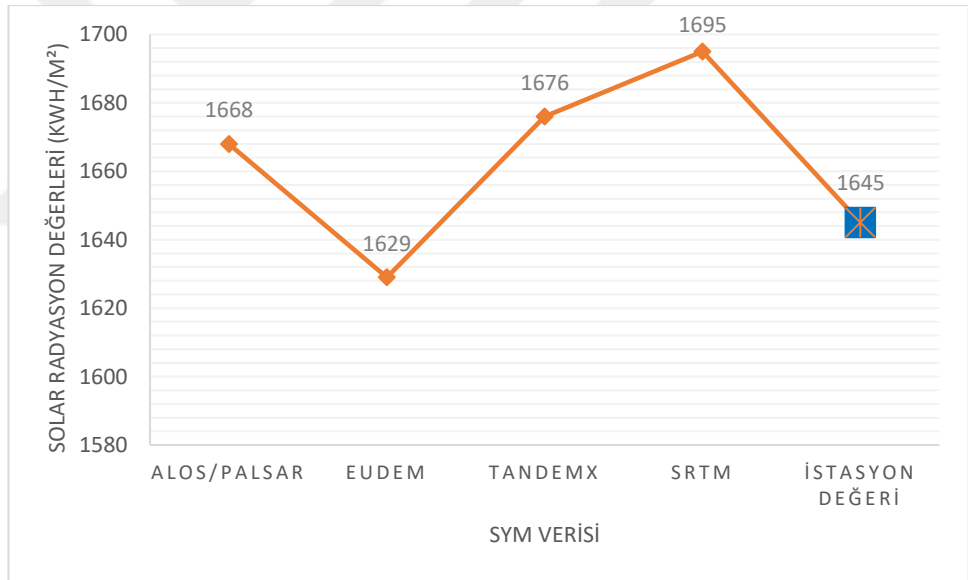
Şekil 4.11. İnönü/THK Tesisleri istasyon noktasına ait solar radyasyon değerleri

Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde; Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda istasyon noktasındaki solar radyasyon değerleri sırasıyla 1612 kWh/m², 1661 kWh/m², 1681 kWh/m² ve 1680 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Mihaliçcik/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda istasyon noktasındaki solar radyasyon değerleri sırasıyla 1670 kWh/m², 1618 kWh/m², 1676 kWh/m² ve 1648 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. İnönü/THK Tesisleri istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda istasyon noktasındaki solar radyasyon değerleri sırasıyla 1557 kWh/m², 1555 kWh/m², 1568 kWh/m² ve 1562 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.

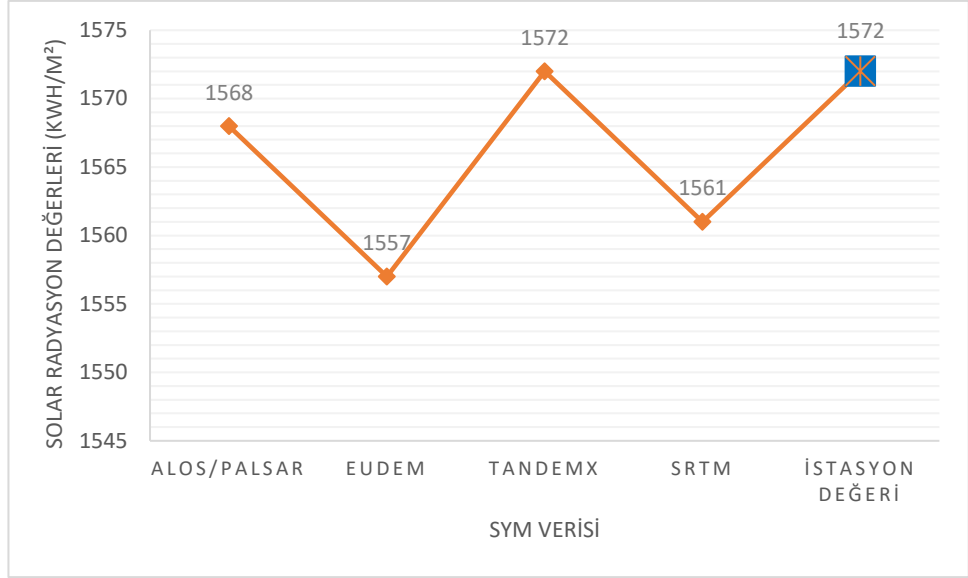
Bu hesaplamalar sonucunda Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda en doğru sonucu 39 kWh/m² farkla TANDEM-X SYM verisinin verdiği, Mihaliçcik/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda en doğru sonucu 3 kWh/m² farkla SRTM SYM verisinin verdiği, İnönü/THK Tesisleri istasyonunda en doğru sonucu 4 kWh/m² farkla TANDEM-X SYM verisinin verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Odunpazarı/Kireçköyü istasyonuna ait OSR değerleri



Şekil 4.13. Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonuna ait OSR değerleri



Şekil 4.14. İñönü/THK Tesisleri istasyonuna ait OSR değerleri

Şekil 4.12, 4.14 ve 4.14 incelendiğinde; Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda tampon alanlar içerisindeki OSR değerleri sırasıyla 1635 kWh/m², 1590 kWh/m², 1644 kWh/m² ve 1682 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda tampon alanlar içerisindeki OSR değerleri sırasıyla 1668 kWh/m², 1629 kWh/m², 1676 kWh/m² ve 1695 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. İñönü/THK Tesisleri istasyonunda ALOS/PALSAR, EUDEM, TANDEM-X ve SRTM SYM verileri üzerinden yapılan hesaplamalarda tampon alanlar içerisindeki OSR değerleri sırasıyla 1568 kWh/m², 1557 kWh/m², 1572 kWh/m² ve 1561 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaplamalar sonucunda Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda en doğru sonucu 37 kWh/m² farkla SRTM SYM verisinin verdiği, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda en doğru sonucu 16 kWh/m² farkla EUDEM SYM verisinin verdiği, İñönü/THK Tesisleri istasyonunda en doğru sonucu 0 kWh/m² farkla TANDEM-X SYM verisinin verdiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu bölümde tez çalışması kapsamında elde edilen bulgulara ilişkin sonuçlara ve tartışmalara yer verilmiştir.

Çalışma kapsamında;

- Çalışma alanına uygun parametre optimizasyonu yapılması solar radyasyon değerlerini nasıl etkiler?
- SYM verilerinin sahip olduğu çözünürlük değerlerinin solar radyasyon değerleri üzerindeki etkisi nedir?

Sorularına cevap aranmıştır. Bu kapsamda parametre optimizasyonu, farklı çözünürlükte SYM verileri kullanarak ASR ve PSR aracında solar radyasyon hesabı ele alınmıştır.

5.1. Sonuç

Parametre optimizasyonu kapsamında, Solar Analiz modülünde, çalışma alanının topografik yapısı göz önüne alınarak topografik parametreler ve radyasyon parametreleri optimize edilmiştir. İstasyon noktalarında; SRTM verisi üzerinden optimizasyon işlemi yapılmadan elde edilen solar radyasyon değerleri ve optimizasyon işlemi sonrası elde edilen solar radyasyon değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. SRTM verisi üzerinden yapılan optimizasyon işlemi öncesi ve sonrası değerler

OPTİMİZASYON İŞLEMİ	Odunpazarı/Kireçköyü İstasyonu	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası İstasyonu	İnönü/THK Tesisleri İstasyonu
ÖNCESİ DEĞER (kWH/m ²)	1311	1464	1339
SONRASI DEĞER (kWH/m ²)	1688	1648	1580
İSTASYON DEĞERLERİ (kWH/m²)	1719	1645	1572

Çözünürlük etkisinin irdelenmesi kapsamında 12.5 m, 25 m, 27 m ve 28 m çözünürlüklere sahip 4 farklı SYM verisi üzerinden alansal ve noktasal olmak üzere 2 farklı yöntem kullanarak hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçlar; SYM tabanlı Solar Analiz modelinin solar radyasyon değerlerini makul bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir.

Nokta bazlı hesaplama sonucu elde edilen solar radyasyon değerleri analiz edildiğinde SYM verilerine ait çözünürlük değerlerindeki artışın sonuçları aynı oranda etkilemediği görülmüştür. Nokta bazlı hesaplamalara göre en doğru sonucu veren SYM verileri Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. PSR aracında en doğru sonucu veren SYM verileri

YÖNTEM	Odunpazarı/Kireçköyü İstasyonu	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası İstasyonu	İnönü/THK Tesisleri İstasyonu
NOKTASAL OLARAK HESAPLAMA	TANDEM-X SYM verisi (15 kWh/m ² farkla)	SRTM SYM verisi (9 kWh/m ² farkla)	SRTM SYM verisi (1 kWh/m ² farkla)

Alansal olarak yapılan hesaplamalar sonucunda hem tampon alanlar içerisindeki OSR değerleri hem de istasyon noktalarında okunan solar radyasyon değerleri analiz edildiğinde, noktasal hesaplamalarda da olduğu gibi SYM verilerinin çözünürlük değerleri ile solar radyasyon değerleri arasında paralel bir artış ya da azalış olmadığı görülmüştür. Alansal olarak yapılan hesaplamalara göre en doğru sonucu veren SYM verileri Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. ASR aracında en doğru sonucu veren SYM verileri

YÖNTEM	Odunpazarı/Kireçköyü İstasyonu	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası İstasyonu	İnönü/THK Tesisleri İstasyonu
TAMPON ALAN İÇERİSİNDE YAPILAN HESAPLAMA	SRTM SYM verisi (37 kWh/m ² farkla)	EUDEM SYM verisi (16 kWh/m ² farkla)	TANDEM-X verisi (0 kWh/m ² farkla)
İSTASYON NOKTASINDA YAPILAN HESAPLAMA	TANDEM-X SYM verisi (39 kWh/m ² farkla)	SRTM SYM verisi (3 kWh/m ² farkla)	TANDEM-X verisi (4 kWh/m ² farkla)

Parametre optimizasyonu işlemi ardından farklı SYM verileri kullanılarak yapılan hesaplama sonuçlarının doğruluğunu irdelemek amacıyla bu değerlerle yer gözlem istasyonlarında ölçülen solar radyasyon değerleri karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Bu

karşılaştırma işlemlerinde sonuçlara ait karesel ortalama hata (RMSE) oranı ve bağıl hata hesaplanmıştır. Karşılaştırma işlemlerinde bağıl hatanın RMSE oranından düşük olduğu verilerin yüksek doğrulukta ve kabul edilebilir düzeyde sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Noktasal olarak yapılan hesaplamalarda karşılaştırma işlemleri sonucunda; Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda sırasıyla %1.57 ve %0.87 bağıl hata ile ALOS/PALSAR ve TANDEM-X verisinin, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda sırasıyla %0.67, %0.61 ve %1.09 bağıl hata ile ALOS/PALSAR, SRTM ve TANDEM-X verisinin ve İnönü/THK Tesisleri istasyonunda sırasıyla %0.70, %0.06 ve %0.70 bağıl hata ile ALOS/PALSAR, SRTM ve TANDEM-X verisinin yüksek doğrulukta ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Alansal olarak yapılan hesaplamalarda istasyon noktalarında ölçülen değerlere ait karşılaştırma işlemleri sonucunda; Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda sırasıyla %2.27, %2.21 ve %3.37 bağıl hata ile SRTM, TANDEM-X ve EUEM verisinin, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda %0.18 bağıl hata ile SRTM verisinin ve İnönü/THK Tesisleri istasyonunda sırasıyla %0.64 ve %0.25 bağıl hata ile SRTM ve TANDEM-X verisinin yüksek doğrulukta ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Alansal olarak yapılan hesaplamalarda OSR değerlerine ait karşılaştırma işlemleri sonucunda; Odunpazarı/Kireçköyü istasyonunda sırasıyla %4.89, %2.15 ve %4.36 bağıl hata ile ALOSPALSAR, SRTM ve TANDEM-X verisinin, Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası istasyonunda sırasıyla %1.40, %1.89 ve %0.97 bağıl hata ile ALOS/PALSAR, TANDEM-X ve EUEM verisinin ve İnönü/THK Tesisleri istasyonunda sırasıyla %0.25 ve %0 bağıl hata ile ALOS/PALSAR ve TANDEM-X verisinin yüksek doğrulukta ve kabul edilebilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

SYM verileri üzerinden yapılan hesaplama sonuçlarına ait solar radyasyon değerleri ile istasyon noktalarında yersel ölçümlerle ölçülen solar radyasyon değerleri arasındaki farklar, hesaplanan değerlere ait RMSE oranı ve bağıl hata Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4. *Fark, RMSE oranı ve bağıl hata tablosu*

Yöntem	İstasyonlar	Karşılaştırma	Alos/Palsar	SRTM	Tandemx	Eudem
Noktasal	Odunpazarı/Kireçk öyü	Fark (KWh/m ²)	27	31	15	37
		RMSE oranı (%)	1.66			
		Bağıl hata (%)	1.57	1.80	0.87	2.15
	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası	Fark (KWh/m ²)	11	9	18	41
		RMSE oranı (%)	1.43			
		Bağıl hata (%)	0.67	0.61	1.09	2.50
	İnönü/THK Tesisleri	Fark (KWh/m ²)	11	1	11	24
		RMSE oranı (%)	0.91			
		Bağıl hata (%)	0.70	0.06	0.70	1.53
Alansal (OSR)	Odunpazarı/Kireçk öyü	Fark (KWh/m ²)	84	37	75	129
		RMSE oranı (%)	5.1			
		Bağıl hata (%)	4.89	2.15	4.36	7.49
	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası	Fark (KWh/m ²)	23	50	31	16
		RMSE oranı (%)	1.98			
		Bağıl hata (%)	1.40	3.04	1.89	0.97
	İnönü/THK Tesisleri	Fark (KWh/m ²)	4	11	0	15
		RMSE oranı (%)	0.60			
		Bağıl hata (%)	0.25	0.70	0	0.95
Alansal (İstasyon noktaları)	Odunpazarı/Kireçk öyü	Fark (KWh/m ²)	107	39	38	58
		RMSE oranı (%)	3.88			
		Bağıl hata (%)	6.22	2.27	2.21	3.37
	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası	Fark (KWh/m ²)	25	3	31	27
		RMSE oranı (%)	1.46			
		Bağıl hata (%)	1.52	0.18	1.89	1.64
	İnönü/THK Tesisleri	Fark (KWh/m ²)	15	10	4	17
		RMSE oranı (%)	0.80			
		Bağıl hata (%)	0.95	0.64	0.25	1.08

5.2. Tartışma

Bu çalışma; Solar Analiz modülünde yüksek çözünürlüklere sahip SYM verileri kullanıldığında ve çalışma alanına en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi durumunda, yersel ölçüm verilerine ihtiyaç duymadan, kısa zamanda, düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta solar radyasyon hesabı yapılabildiğini göstermektedir.

Çalışma alanına göre radyasyon parametreleri ve topografik parametrelerin optimize edilmesi, çalışmanın doğru bir şekilde sonuçlandırılmasındaki en önemli

adımdır. Yapılan analizlerde parametrelerdeki ufak değişimlerin, sonuçlar üzerinde yadsınamaz bir etkisinin olduğunu göstermiştir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, aralarında yüksek miktarda çözünürlük farklı bulunan SYM kullanıldığında, çözünürlük değerinin arttıkça hesaplanan solar radyasyon değerlerinin gerçek değerlere yaklaştığı görülmüştür. Yapılan bu çalışma sonucunda ise çözünürlük değerleri ile OSR değerleri ve istasyon noktalarında okunan solar radyasyon değerleri arasında paralel bir artış ya da azalış olmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin SYM verilerinin sahip olduğu çözünürlük değerleri arasında fazla miktarda fark bulunmaması ve çözünürlüğün arttıkça arazi yüzeyindeki solar radyasyonu engelleyici detayların netleşmesi olduğu düşünülmektedir.

Çalışma boyunca Eskişehir ilinde bulunan ve solar radyasyon ölçümü yapılan üç istasyon üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. İstasyonların bulunduğu konumlar incelendiğinde; bu konumların çevresinde gelen solar radyasyon miktarını fazla derecede etkileyecek engelleyici bir unsur tespit edilmemiştir. Fakat daha önce yapılan çalışmalar solar radyasyon miktarını hesaplamak için birkaç meteoroloji istasyonunda yapılan ölçümlere dayalı basit enterpolasyon metodolojilerinin kullanılmasının, karmaşık topoğrafyaya sahip alanlarda solar radyasyon miktarını iyi bir şekilde tahmin etmediğini ortaya koymuştur. Bunun nedeni, topografyanın kısa mesafelerde güneş ışınımında önemli değişimlere neden olması olarak belirtilmiştir. Bu sebeple çalışma alanı seçilirken; topografyanın solar radyasyon potansiyelini ne ölçüde etkilediğinin net olarak belirlenmesi için ölçüm yapılan meteoroloji istasyonlarının bulunduğu konumların topografik özelliklerinin farklı olmasına dikkat edilmelidir.

Tez çalışması boyunca, Solar Analiz modülünde alansal solar radyasyon hesaplamaları Eskişehir iline ait ortalama enlem değeri referans alınarak yapılmıştır. Bu modülde saha enleminin solar radyasyon değerlerini nasıl etkilediğini tespit etmek amacıyla; SRTM verisi üzerinden, ortalama enlem değeri $\pm 2^\circ$ alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama sonucunda istasyon noktalarında okunan solar radyasyon değerleri Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. *Enlem değeri $\pm 2^\circ$ alınarak yapılan solar radyasyon hesaplamaları*

ENLEM DEĞERLERİ DEĞİŞİMİ	Odunpazarı/Kireçköyü İstasyonu	Mihalıççık/Kızıltepe Orman Sahası İstasyonu	İnönü/THK Tesisleri İstasyonu
+2°	1443	1583	1518
Ortalama enlem	1680	1648	1562
-2°	1563	1710	1639
İstasyon Değerleri	1719	1645	1572

Tablo 5.5'teki sonuçlar irdelendiğinde her üç istasyonda da enlem değeri 2° arttırıldığında solar radyasyon değerinde azalış, 2° azaltıldığında ise Odunpazarı/Kireçköyü istasyonuna ait solar radyasyon değerlerinde azalış, diğer iki istasyona ait solar radyasyon değerlerinde ise artış meydana geldiği görülmüştür. Ortalama enlem değerinden uzaklaşıldığında solar radyasyon değerlerinde sapmaların meydana geldiği görülmüştür.

5.3. Öneriler

Solar Analiz modeli hesaplamalarda atmosferik geçirgenliğe ihtiyaç duymaktadır. Bu parametre bulutların varlığına karşı oldukça hassastır ve doğru bir değer elde etmeyi oldukça zorlaştırır. Bu sebeple iklim çeşitliliği ne kadar uzun olursa tahminlerin güvenilirliği o kadar artar. Daha önce yapılan çalışmalar, Solar Analiz modelinin güvenilirliğinin sonbahar ve kış aylarında azalabileceğini göstermiştir. Bunun arkasındaki mantığın sonbahar ve kış aylarında atmosferik karmaşıklığın artmasından dolayı atmosferin parametrelendirilmesinin zorlaşabileceği olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple daha güvenilir sonuç değerlerine ulaşmak için çalışmalar ay bazında yapılabilir.

Hesaplamalardaki hata düzeylerini minimize etmek için farklı radyasyon modelleri kullanılabilir. Bunlar; SRAD, r.sun ve Solei-32 modelleridir.

Tez çalışması boyunca alansal solar radyasyon hesaplamalarında ortalama enlem değeri referans alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda ortalama enlem değerinden uzaklaşıldığında solar radyasyon değerlerinde sapmaların meydana geldiği görülmüştür. Ülke bazlı yapılacak hesaplamalarda; birden çok enlem değeri mevcut ise hatalı sonuçlarla karşılaşılma ihtimali göz önüne alınarak, çalışma alanı enlem değerlerine göre birden çok parçaya bölünüp, işlem yapılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J. (2009). A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149-8, 1343-1357.
- Aras, H., Balli, O., Hepbasli, A. (2006). Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2240-2249.
- Bayram, A. (2022). Küresel ve Yaygın Güneş Radyasyonunun Tahmini İçin Farklı Modellerin Karşılaştırılması, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 28.
- Belgin Dikmen, Ç., Gültekin, A. (2011). Sürdürülebilirlik Kapsamında Yapılarda Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*. (111-133),96-100.
- Bessafi, M., Oree, V. (2018). Downscaling solar irradiance using DEM-based model in young volcanic islands with rugged topography. *Renewable Energy*, 126, 584-593.
- Bosch, J. (2006). Meteorological Applications, *Renewable Energy*, 13(3), 279-287.
- Demirgöl, T., Demir, V., Sevimli, M. (2023). Model-Ağacı (M5-tree) yaklaşımı ile HELIOSAT tabanlı güneş radyasyonu tahmini. *Geomatik* 8(2), 124-135
- Đuračiová, R., Pružinec, F. (2022). Effects of Terrain Parameters and Spatial Resolution of a Digital Elevation Model on the Calculation of Potential Solar Radiation in the Mountain Environment: A Case Study of the Tatra Mountains. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 389.
- Dubayah, R., Rich, P. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *International journal of geographical information systems*, 9:4, 405.
- Dubayah, R., Rich, P. (1996). GIS-based solar Radiation modeling. *GIS World Book*, 1, 2.
- Duffie, J.A., Beckmann, W.A. (2013). *Solar Engineering and Thermal Process*, 4. John Wiley and Sons.
- Ener, Rusen, S., Konuralp, A. (2020). Quality control of diffuse solar radiation component with satellite-based estimation methods. *Renewable Energy*, 145, 1772-1779.
- Ertekin, C., Yaldız, O. (1999). Data bank Estimation of monthly average daily global radiation on horizontal surface for Antalya "Türkiye". *Renewable Energy*, 17-1, 95-102.

- Fu, P., Rich, P., (2000). The Solar Analyst 1.0 Manuel. Environmental Modeling Institute, 28, 46.
- Fu, P., Rich, P., (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI Users Conference.
- Gaukler, S., Hathcock, C., Fair, J. (2018). Inorganic Elements in Eggs of Two Cavity-Nesting Passerine Species at and around Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico. Journal of Environmental Protection, 932, 48.
- Güler, Ç., Çobanoğlu, Z. (1994). Elektromanyetik Radyasyon, 1. Ankara: Aydoğdu Ofset
- Hofierka, J. (2002). The solar Radiation model for Open source GIS: implementation and applications. GRASS users conference, 1, 8.
- Hu, Y., Li, Q., Zuo, Z., Duan, YL. (2013). Boolean- Based Surface Procedure for the External Heat Transfer Analysis of Dams during Construction. Mathematical Problems in Engineering. 1-17.
- İneichen, P., Guisan, O., Perez, R. (1990). Ground-reflected radiation and albedo. Solar Energy, 44(4), 207-214.
- Kausika, B., Van Sark, W. (2021). Calibration and Validation of ArcGIS Solar Radiation Tool for Photovoltaic Potential Determination in the Netherlands. Energies, 14(7), 1865.
- Karaveli, A., Akinoglu B. (2018). Development of new monthly global and diffuse solar irradiation estimation methodologies and comparisons. International Journal of Green Energy, 15(5), 333-346.
- Martínez, M., Andújar, J., Enrique, J. (2009). A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range. Sensors, 9(6), 4615-4634.
- Miklánek, P., Mészáros, I.(1993). Modelling of insolation characteristics in mountainous environment. Solar Energy, 32-36, 43.
- Muneer, T. (2007). Solar Radiation and Daylight Models. Routledge, 2, 240.
- Özdemir, Y. (2012). Uydu Tabanlı Kuadratik Model ile Türkiye’de Güneş Radyasyonu Dağılımının Belirlenmesi. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özgür, E. (2020). Türkiye'nin Enerji Görünümü. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, 717, 231.
- Öztürk, H. H. (2018). Yenilenebilir Enerji Kaynakları, 2. Birsen Yayınevi

- Ruşen, S. (2013). Linking Satellite Imagery To bright sunshine hours for the estimation of global solar irradiation, The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University (Ph. D. Thesis). 28.
- Šúri, M., Hofierka, J. (2004). A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. Transactions in GIS, 8(2), 175-190.
- Wilson, J., Gallant, J. (2000). Terrain Analysis Principles and Applications. John Wiley & Sons, 1, 125.
- Tovar-Pescador, J. (2009). Agricultural and Forest Meteorology, 149(8), 1343-1357.
- Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., (2006). On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. Department of Electrical and Thermal Engineering University of Huelva, 48, 279-287.
- Yenisey, D., (2015). İç Anadolu Bölgesi için Güneye Bakan Eğimli Yüzeye Gelen Günlük Küresel, Direkt ve Yaygın Radyasyonun Hesaplanması. Yayımlanmış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yu, L., Zhang, M., Wang, L., Qin, W., Jiang, D., Li, J. (2022). Variability of surface solar radiation under clear skies over Qinghai-Tibet Plateau: Role of aerosols and water vapor. Atmospheric Environment, 287, 97.
- http-1: <https://equatorstudios.com/> (Erişim tarihi: 29.04.2024)
- http-2: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (Erişim tarihi: 14.01.2024)
- http-3: <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy/> (Erişim tarihi: 01.02.2024)
- http-5: <https://hubblesite.org/contents/articles/the-electromagnetic-spectrum> (Erişim tarihi: 01.03.2024)
- http-5: <https://longline.com.tr/blog/2020/08/14/elektromanyetik-dalga-nedir/> (Erişim tarihi: 12.04.2024)
- http-6: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Kızılötesi> (Erişim tarihi: 03.03.2024)
- http-7: <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/gunes-isc-sunlight.html> (Erişim tarihi: 14.03.2024)
- http-8: <https://mgm.gov.tr/> (Erişim tarihi: 18.01.2024)
- http-9: <https://es.wikipedia.org/wiki/Piranómetro> (Erişim tarihi: 02.04.2024)
- http-10: <https://www.enerjibes.com/> (Erişim tarihi: 08.03.2024)

http-11: <https://www.sevensensor.com/tr> (Erişim tarihi: 17.02.2024)

http-12: <https://www.hukseflux.com/> (Erişim tarihi: 11.02.2024)

http-13: <https://atmosphere.copernicus.eu/solar-radiation-supplementary-products>
(Erişim tarihi: 06.04.2024)

http-14: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radius (Erişim tarihi: 03.03.2024)

http-15: <https://www.uscgislab.net> (Erişim tarihi: 01.01.2024)

http-16: <https://www.eskisehir.ktb.gov.tr>

http-17: <https://www.capital.com.tr>

http-18: <https://www.tupras.com.tr>

http-19: <https://ecat.ga.gov/geonetwork/srv/eng/catatolg.search#/metadata/72759/> (Erişim tarihi: 21.03.2024)

http-20: <https://tandemx-science.dlr.de/cgi-bin/wcm.pl?page=TDM-Mission> (Erişim tarihi: 21.03.2024)

http-21: <https://land.copernicus.eu/> (Erişim tarihi: 17.03.2024)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0002-8056-6858

Ad Soyad : Gizem ÖZKAYA

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü
- 2021, Harita Mühendisi, Devlet Su İşleri 3.Bölge Müdürlüğü, Emlak ve Kamulaştırma Şube Müdürlüğü.